



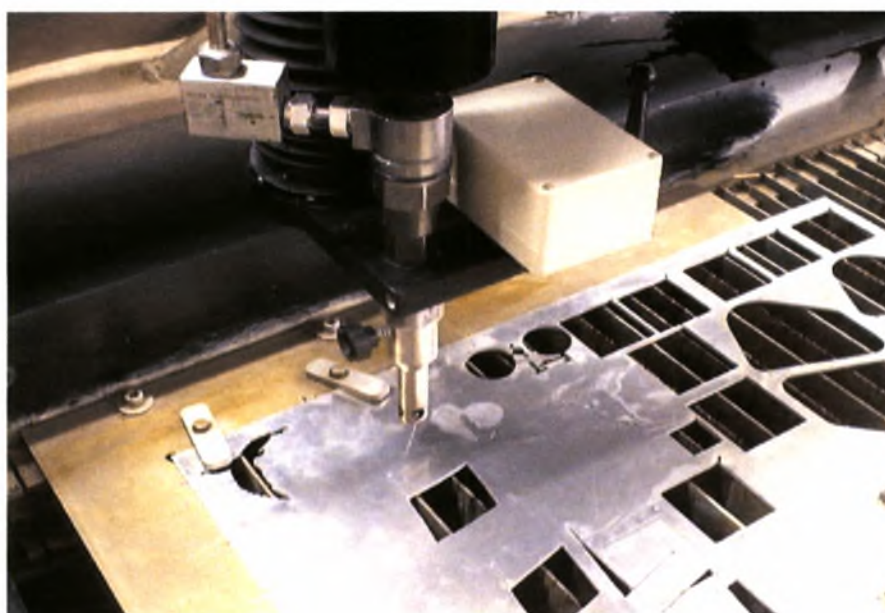
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ :

«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΚΟΠΗΣ ΜΕ ΠΙΔΑΚΑ ΝΕΡΟΥ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΥΣ ΚΥΡΙΟΥΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ, ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΑΡΑΓΟΝΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ»



ΕΠΙΜΕΛΙΑ: ΒΑΣΙΛΑΚΗΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

ΒΟΛΟΣ 2005



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.:	3484/1
Ημερ. Εισ.:	17-07-2006
Δωρεά:	Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός:	ΠΤ -- ΜΜΒ
	2005
	ΒΑΣ

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Γεώργιος Πετρόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Γρηγόρης Χαϊδεμενόπουλος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Αντώνης Κατσαμάς
Διδάσκων ΠΔ 407/80, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Γεώργιο Πετρόπουλο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του κατά την διάρκεια της δουλείας μου. Επίσης είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητής Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο και Δρ. Αντώνη Κατσαμά για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους διδάσκοντες του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας Βόλου για τις πολύτιμες και βασικές γνώσεις που μου παρείχαν στα πλαίσια των προπτυχιακών μαθημάτων.

Ευχαριστώ τους προσωπικό τους μεταπτυχιακούς και διδακτορικούς φοιτητές εργαστηρίου της Μηχανουργικών Κατεργασιών για την σημαντική της βοήθεια στην περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ και να αφιερώσω αυτή την εργασία στου γονείς μου που με στήριξαν ηθικά και οικονομικά κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	-10-
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	-15-
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	-17-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΥΔΡΟΚΟΠΗ ΣΕ ΧΑΛΥΒΑ TRIP

1.1 Γενικά.....	-19-
1.2 Τμήματα συστήματος υδροκοπής.....	-20-
1.2.1 Αντλία θετικών μετατοπίσεων.....	-20-
1.2.2 Πολλαπλασιαστής πίεσης	-21-
1.2.3 Κεφαλές κοπής.....	-22-
1.2.4 Κεντρικός πίνακας ελέγχου και τραπέζι κοπής.....	-24-
1.2.5 Παράμετροι υδροκοπής.....	-25-
1.3 Δυνατότητες υδροκοπής.....	-27-
1.3.1 Πλεονεκτήματα υδροκοπής.....	-28-
1.3.2 Μειονεκτήματα υδροκοπής.....	-31-
1.3.3 Σύγκριση υδροκοπής και λείζερ.....	-33-
1.3.4 Σύγκριση υδροκοπής και ηλεκτροδιάβρωσης.....	-34-
1.3.5 Σύγκριση υδροκοπής και κοπής με πλάσμα.....	-35-
1.3.6 Σύγκριση υδροκοπής και κοπής με τóρνευση.....	-35-
1.4 Εφαρμογές κοπή με νερό υψηλής πίεσης.....	-36-
1.5 Χάλυβας TRIP.....	-39-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ

2.1 Γενικά.....	-44-
2.2 Τραχύτητα επιφάνειας.....	-46-
2.3 Περιγραφή συστήματος M.....	-50-
2.4 Παράμετροι μέτρησης της Τραχύτητας.....	-52-
2.4.1 Μέση αριθμητική τραχύτητα R_a	-52-
2.4.2 Μέση τετραγωνική τιμή της τραχύτητας R_q	-53-
2.4.3 Μέγιστο Βάθος R_t και Μέγιστη διαφορά κορυφής από κοιλάδα (R_y).....	-54-

2.4.4 Μέτρηση ύψους 5 σημείων R_z	-54-
2.4.5 Μέσο διάστημα διαδοχικών τοπικών κορυφών (R_s ή S_m).....	-55-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

3.1 Γενικά.....	-56-
3.2 Παραγοντικός σχεδιασμός (factorial design).....	-57-
3.3 Ανάλυση παλινδρόμησης.....	-57-
3.4 Γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης.....	-58-
3.5 Η μέθοδος των ελάχιστων τετράγωνων.....	-59-
3.5.1 Η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων.....	-60-
3.5.2 Τα σφάλματα εκτίμησης ή κατάλοιπα.....	-61-
3.5.3 Ανάλυση διακύμανσης.....	-62-
3.6 Η διαδικασία εκτίμησης ενός μοντέλου Παλινδρόμησης.....	-63-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

4.1 Γενικά.....	-66-
4.2 Στερεοσκόπιο.....	-66-
4.3 Image pro plus.....	-68-
4.4 Taylor-Hobson surtonic3+.....	-69-
4.4.1 Αρχή λειτουργίας του surtonic3+.....	-70-
4.4.2 Talysurface.....	-72-
4.5 MiniTab 14.....	-73-
4.5.1 Ανάλυση παλινδρόμησης.....	-73-
4.5.2 Διαγραμματική απεικόνιση κατάλοιπων.....	-76-
4.5.3 Επιφάνειες προσαρμογής.....	-78-
4.5.4 Διαγραμματική απεικόνιση κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων.....	-79-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

5.1 Χαλυβες TRIP 800 HR-FH και 700 CR-FH.....	-82-
5.2 Πειραματικές μετρήσεις.....	-84-
5.3 Παράμετροι κοπής.....	-85-
5.4 Μετρήσεις αρμού κοπής και τραχύτητας	-85-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ**ΤΟΥ ΑΡΜΟΥ ΚΟΠΗΣ ΓΙΑ ΧΑΛΥΒΑ TRIP 800 HR-FH**

6.1 Κατάρτιση στοχαστικού μοντέλου.....	-91-
6.2 Επιλογή στοχαστικού μοντέλου.....	-92-
6.3 Γραφήματα κατάλοιπων.....	-94-
6.4 Επιφάνειες προσαρμογής.....	-97-
6.5 Διαγράμματα κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων.....	-100-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ**ΤΟΥ ΑΡΜΟΥ ΚΟΠΗΣ ΓΙΑ ΧΑΛΥΒΑ TRIP 700 CR-FH**

7.1 Κατάρτιση στοχαστικού μοντέλου.....	-104-
7.2 Επιλογή στοχαστικού μοντέλου.....	-105-
7.3 Γραφήματα Κατάλοιπων.....	-107-
7.4 Επιφάνειες προσαρμογής.....	-111-
7.5 Διαγράμματα κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων.....	-103-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΧΑΛΥΒΑ TRIP 800 HR-FH

8.1 Κατάρτιση στοχαστικού μοντέλου.....	-117-
8.2 Επιλογή στοχαστικού μοντέλου.....	-118-
8.3 Γραφήματα Κατάλοιπων.....	-119-
8.4 Επιφάνειες προσαρμογής.....	-123-
8.5 Διαγράμματα κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων.....	-126-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΧΑΛΥΒΑ TRIP 700 CR-FH

9.1 Κατάρτιση στοχαστικού μοντέλου.....	-130-
9.2 Επιλογή στοχαστικού μοντέλου.....	-131-
9.3 Γραφήματα Κατάλοιπων.....	-132-
9.4 Επιφάνειες προσαρμογής.....	-136-
9.5 Διαγράμματα κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων.....	-138-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

10.1 Γενικά.....	-142-
------------------	-------

10.2 Αρχικά συμπεράσματα.....	-141-
10.3 Στοχαστικά μοντέλα.....	-144-
 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	 -145-
 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	 -178-

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Τυπικό σύστημα υδροκοπής.

Εικόνα 1.2 Αντλία θετικών μετατοπίσεων.

Εικόνα 1.3 Αρχή λειτουργίας πολλαπλασιαστή πίεσης.

Εικόνα 1.4 Κεφαλή κοπής για σύστημα υδροκοπής αμιγούς ύδατος.

Εικόνα 1.5 Κεφαλή κοπής για σύστημα αποξεστικής υδροκοπής.

Εικόνα 1.6 Κατεργασία ακρίβειας η οποία ασφαρίζει τέλεια συναρμογή.

Εικόνα 1.6 Κατεργασία ακρίβειας η οποία ασφαρίζει τέλεια συναρμογή.

Εικόνα 1.8 Κοπή ελασμάτων.

Εικόνα 1.9 Κομμάτι που επεξεργάστηκε με νερό υψηλής πίεσης ενώ βρισκόταν στο τελικό στάδιο κατασκευής του.

Εικόνα 1.10 Σύστημα διήθησης κλειστού βρόγχου, απαραίτητο τμήμα ενός συστήματος υδροκοπής.

Εικόνα 1.11 Κοπή κάτω από την επιφάνεια του νερού σε προσπάθεια μείωσης του προκαλούμενου θορύβου.

Εικόνα 1.12 Κατεργασία με ακτίνα λείζερ.

Εικόνα 1.13 Α-ΣΤ Εφαρμογές κοπής με σύστημα πίδακα νερού υψηλής πίεσης.

Εικόνα 1.14 Σύγκριση αντοχής εφελκυσμού-ολικής παραμόρφωσης για διάφορες κατηγορίες χαλύβων.

Εικόνα 1.15 Αντιστοιχία πλέγματος για τον μετασχηματισμό FCC-BCC στους χάλυβες.

Εικόνα 1.16 Διάγραμμα καμπύλων ελεύθερης ενέργειας σε συνάρτηση με την θερμοκρασία για την μητρική (ωστενιτική) και μαρτενσιτική φάση.

Εικόνα 1.17 Διάγραμμα μαρτενσιτικού μετασχηματισμού συναρτήσει της θερμοκρασίας και της επιβαλλόμενης τάσης.

Εικόνα 2.1 Τομή μίας μεταλλικής επιφάνειας ύστερα από κατεργασία κοπής.

Εικόνα 2.2 Μορφολογίας της κατεργασμένης επιφάνειας.

Εικόνα 2.3 Απόκλιση θεωρητικής και πραγματικής επιφάνειας.

Εικόνα 2.4 Σύνθεση της πραγματικής επιφάνειας με υπέρθεση των αποκλίσεων όλων των τάξεων (δισδιάστατη προσέγγιση).

Εικόνα 2.5 Ορισμός κεντρικής γραμμής και δειγματοληπτικού μήκους L.

Εικόνα 2.6 Ορισμός μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a .

- Εικόνα 2.7** Ορισμός μέγιστο Βάθος R_z
Εικόνα 2.8 Ορισμός μέσου διαστήματος διαδοχικών τοπικών κορυφών s_m .
- Εικόνα 3.1** Διάγραμμα διασποράς .
- Εικόνα 4.1** Στερεοσκόπιο.
- Εικόνα 4.2** Τραχύμετρο τύπου *Rank Taylor-Hobson Sutronic 3+*.
- Εικόνα 4.3** Ηλεκτρομικρογραφία μιας ακίδας 40° κατασκευασμένη από διαμάντι.
- Εικόνα 4.4** Μέτρηση επιφανειακής ανωμαλίας με ακίδα μεγάλης κωνικότητας.
- Εικόνα 4.5** Παρουσίαση της πραγματικής διαδρομής της ακίδας καθώς ανιχνεύει την επιφάνεια.
- Εικόνα 4.6** Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας.
- Εικόνα 4.7** Ιστόγραμμα καταλοίπων.
- Εικόνα 4.8** Διάγραμμα καταλοίπων σε σχέση με τις εκτιμώμενες τιμές.
- Εικόνα 4.9** Τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση της εξαρτημένης μεταβλητής και των ανεξάρτητων μεταβλητών
- Εικόνα 4.10** Διάγραμμα κύριων επιδράσεων
- Εικόνα 4.11** Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων
- Εικόνα 5.1** Θερμική επεξεργασία χαλύβων TRIP
- Εικόνα 5.2** Μορφή των δοκιμίων
- Εικόνα 5.3** Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας του αρμού κοπής
- Εικόνα 5.4** Μέτρηση της γεωμετρίας του αρμού κοπής
- Εικόνα 6.1** Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας των καταλοίπων για το *kerf* χάλυβα TRIP 800 HR-FH
- Εικόνα 6.2** Ιστόγραμμα των υπολοίπων για το *kerf* χάλυβα TRIP 800 HR-FH
- Εικόνα 6.3** Διάγραμμα υπολοίπων σε σχέση σειρά παρατήρησης για *kerf* χάλυβα TRIP 800 HR-FH
- Εικόνα 6.4** Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμώμενες τιμές για *kerf* χάλυβα TRIP 800 HR-FH
- Εικόνα 6.5** Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνισης της εξαρτημένης μεταβλητής *kerf* και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Trav. Sp.* και *St Off Dist* σε χάλυβα TRIP 800 HR-FH
- Εικόνα 6.6** Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνισης της εξαρτημένης μεταβλητής *kerf* και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Noz Diam.* και *St Off Dist.* σε χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Εικόνα 6.7 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνισης της εξαρτημένης μεταβλητής *kerf* και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Noz Diam.* και *Trav. sp.* σε χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Εικόνα 6.8 Διάγραμμα κύριων επιδράσεων κάθε παράγοντα για το *kerf* χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Εικόνα 6.9 Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων κάθε παράγοντα για το *kerf* χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Εικόνα 7.1 Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας των καταλοίπων για το *kerf* χάλυβα TRIP 700 HR-FH

Εικόνα 7.2 Ιστόγραμμα των υπολοίπων για το *kerf* χάλυβα TRIP 700 HR-FH

Εικόνα 7.3 Διάγραμμα υπολοίπων σε σχέση με τη σειρά παρατήρησης για *kerf* χάλυβα χάλυβα TRIP 700 HR-FH

Εικόνα 7.4 Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμώμενες τιμές για *kerf* χάλυβα χάλυβα TRIP 700 HR-FH

Εικόνα 7.5 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνισης της εξαρτημένης μεταβλητής *kerf* και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Trav. Sp.* και *St Off Dist* χάλυβα TRIP 700 HR-FH

Εικόνα 7.6 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνισης της εξαρτημένης μεταβλητής *kerf* και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Noz Diam.* και *St Off Dist.* σε χάλυβα TRIP 700 HR-FH

Εικόνα 7.7 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνισης της εξαρτημένης μεταβλητής *kerf* και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Noz Diam.* και *Trav. sp.* σε χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Εικόνα 7.8 Διάγραμμα κύριων επιδράσεων κάθε παράγοντα για το *kerf* χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Εικόνα 7.9 Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων κάθε παράγοντα για το *kerf* χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Εικόνα 8.1 Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας των καταλοίπων για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Εικόνα 8.2 Ιστόγραμμα των υπολοίπων για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Εικόνα 8.3 Διάγραμμα υπολοίπων σε σχέση σειρά παρατήρησης για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Εικόνα 8.4 Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμώμενες τιμές για *kerf* χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Εικόνα 8.5 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνιση της εξαρτημένης μεταβλητής, δηλαδή της τραχύτητας και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Trav. Sp.* και *St Off Dist* σε χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Εικόνα 8.6 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνισης της εξαρτημένης μεταβλητής, δηλαδή της τραχύτητας και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Noz Diam.* και *St Off Dist.* σε χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Εικόνα 8.7 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνιση της εξαρτημένης μεταβλητής, τραχύτητα, και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Noz Diam.* και *Trav. sp.* χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Εικόνα 8.8 Διάγραμμα κύριων επιδράσεων κάθε παράγοντα για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Εικόνα 8.9 Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων κάθε παράγοντα για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Εικόνα 9.1 Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας των καταλοίπων για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 700 CR-FH

Εικόνα 9.2 Ιστόγραμμα των υπολοίπων για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 700 CR-FH

Εικόνα 9.3 Διάγραμμα υπολοίπων σε σχέση σειρά παρατήρησης για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 700 CR-FH

Εικόνα 9.4 Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμώμενες τιμές για *kerf* χάλυβα TRIP TRIP 700 CR-FH

Εικόνα 9.5 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνισης της εξαρτημένης μεταβλητής, δηλαδή της τραχύτητας, και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Trav. Sp.* και *St Off Dist* σε χάλυβα TRIP 700 CR-FH

Εικόνα 9.6 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνισης της εξαρτημένης μεταβλητής, δηλαδή της τραχύτητας, και των ανεξάρτητων *Noz Diam.* και *St Off Dist.* σε χάλυβα TRIP 700 CR-FH

Εικόνα 9.7 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνιση της εξαρτημένης μεταβλητής, δηλαδή της τραχύτητας, και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Noz Diam.* και *Trav. sp.* σε χάλυβα TRIP 700 CR-FH

Εικόνα 9.8 Διάγραμμα κύριων επιδράσεων κάθε παράγοντα για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 700 CR-FH

Εικόνα 9.9 Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων κάθε παράγοντα για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 700 CR-FH

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 Εκτιμώμενος χρόνος για κοπή με νερό υψηλής πίεσης

Πίνακας 1.2 Παράμετροι υδροκοπής

Πίνακας 2.1 Κατάταξη επιφανειακών αποκλίσεων κατεργασμένης επιφάνειας (DIN 4760).

Πίνακας 4.1 Ανάλυση παλινδρόμησης

Πίνακας 4.2 Ανάλυση διακύμανσης

Πίνακας 5.1 Χημική σύσταση των χαλύβων TRIP 800 HR-FH και 700 CR-FH

Πίνακας 5.2 Ιδιότητες χαλύβων TRIP 800 HR-FH και 700 CR-FH

Πίνακας 5.3 Παράγοντες στοχαστικού μοντέλου κοπής

Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα μετρήσεων *kerf* για χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Πίνακας 5.5 Αποτελέσματα μετρήσεων *kerf* για χάλυβα TRIP 700 CR-FH

Πίνακας 5.6 Αποτελέσματα μετρήσεων μέσης αριθμητικής τραχύτητας *Ra* για χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Πίνακας 5.7 Αποτελέσματα μετρήσεων μέσης αριθμητικής τραχύτητας *Ra* για χάλυβα TRIP 700 CR-FH

Πίνακας 6.1 Ανάλυση παλινδρόμησης του πλήρους πολυωνυμικού μοντέλου για το μέσο εύρος αρμού (*kerf*) του χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Πίνακας 6.2 Ανάλυση παλινδρόμησης του προσαρμοσμένου πολυωνυμικού μοντέλου για μέσο εύρος (*kerf*) αρμού του χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Πίνακας 6.3 Ανάλυση παλινδρόμησης του μοντέλου, με τον μεγαλύτερο τροποποιημένο συντελεστή προσδιορισμού για μέσο εύρος αρμού (*kerf*) TRIP 800 HR-FH

Πίνακας 6.4 Ανάλυση διακύμανσης του στοχαστικού μοντέλου για το μέσο εύρος αρμού(*kerf*) κοπής χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Πίνακας 7.1 Ανάλυση παλινδρόμησης του πλήρους πολυωνυμικού μοντέλου για μέσο εύρος

Αρμού (*kerf*) του χάλυβα TRIP 700 HR-FH

Πίνακας 7.2 Ανάλυση παλινδρόμησης του προσαρμοσμένου πολυωνυμικού μοντέλου για μέσο εύρος αρμού(*kerf*) του χάλυβα TRIP 700 HR-FH

Πίνακας 7.3 Ανάλυση παλινδρόμησης του μοντέλου , με τον μεγαλύτερο τροποποιημένο συντελεστή προσδιορισμού για μέσο εύρος αρμού (*kerf*) χάλυβα TRIP 700 HR-FH

Πίνακας 7.4 Ανάλυση διακύμανσης του στοχαστικού μοντέλου για το μέσο εύρος αρμού (*kerf*) κοπής χάλυβα TRIP 700 HR-FH

Πίνακας 8.1 Ανάλυση παλινδρόμησης του πλήρους τετραγωνικού μοντέλου για την τραχύτητα του χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Πίνακας 8.2 Ανάλυση παλινδρόμησης του προσαρμοσμένου τετραγωνικού μοντέλου για την τραχύτητα του χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Πίνακας 8.3 Ανάλυση διακύμανσης του στοχαστικού μοντέλου για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Πίνακας 9.1 Ανάλυση παλινδρόμησης του πλήρους πολυωνυμικού μοντέλου για την τραχύτητα του χάλυβα TRIP 800 HR-FH

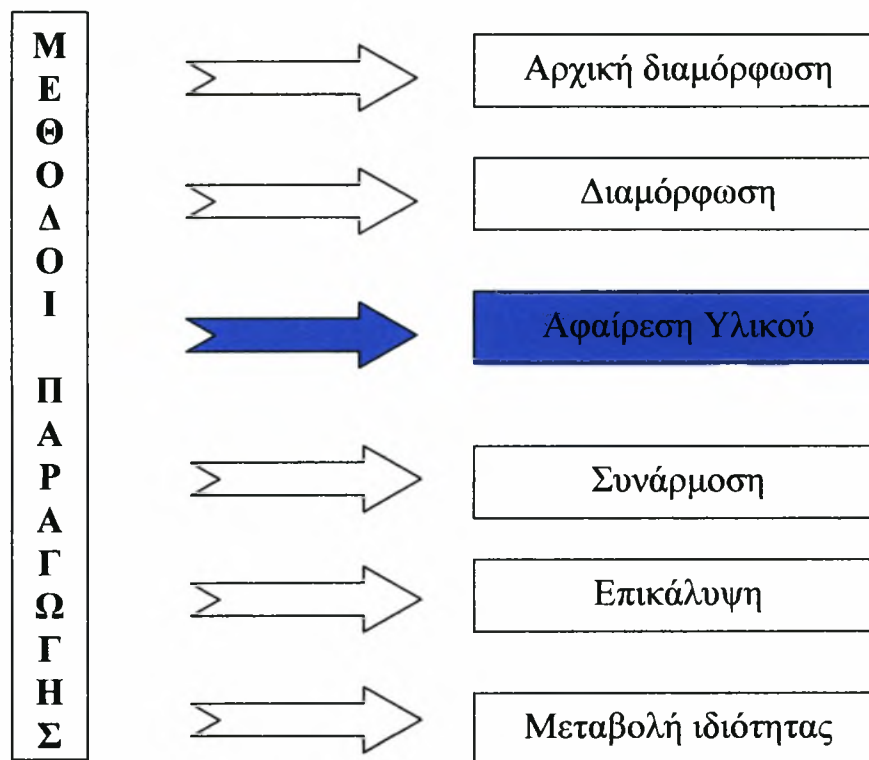
Πίνακας 9.2 Ανάλυση παλινδρόμησης του προσαρμοσμένου πολυωνυμικού μοντέλου για την τραχύτητα του χάλυβα TRIP 700 CR-FH

Πίνακας 9.3 Ανάλυση διακύμανσης του στοχαστικού μοντέλου για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 700 CR-FH

Πίνακας 10.1 Συγκριτικά δεδομένα στοχαστικής μοντελοποίησης.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα περισσότερα προϊόντα που κατασκευάζονται βιομηχανικά υπόκεινται, από την ακατέργαστη έως την τελική κατάσταση τους σε πολλές φάσεις κατεργασίας. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής μεταβάλλεται το γεωμετρικό σχήμα, η μάζα, οι ιδιότητες του υλικού του αντικειμένου παραγωγής. Παρακάτω μπορούμε να δούμε σχηματικά ποιες είναι οι κύριες ομάδες στις οποίες χωρίζονται οι μέθοδοι παραγωγής



Εικόνα 1: Μέθοδοι παραγωγής

Μια από τις πιο σύγχρονες και ταχέως αναπτυσσόμενες μεθόδους παραγωγής προϊόντων στην βιομηχανία, αλλά και γενικότερα, είναι η υδροκοπή (*water machining*). Ανήκει στις κατεργασίες αφαίρεσεως υλικού και πιο συγκεκριμένα στις κατεργασίες κοπής, όπου αφαιρείται προοδευτικά προκαθορισμένος όγκος μετάλλου

με πλαστική παραμόρφωση του κατεργαζόμενου δοκιμίου υπό την μορφή αποβλήτου.

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματεύεται την διερεύνηση της υδροκοπής ως προς τους κύριους παράγοντες κατεργασίας, με απώτερο σκοπό τη στοχαστική μοντελοποίηση των παραμέτρων της κατεργασίας.

Στοχαστικά (*stochastic probabilistic*) ονομάζονται τα επιστημονικά μοντέλα ή πειράματα στα οποία οι γνωστές μεταβλητές (ανεξάρτητες) δεν αρκούν για την ακριβή πρόβλεψη των εξαρτημένων μεταβλητών. Τα στοχαστικά πειράματα επηρεάζονται από απρόβλεπτους παράγοντες, την «τύχη» η οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι περιέχει όλες τις άγνωστες μεταβλητές-παράγοντες που δεν λαμβάνονται υπόψιν κατά την διεξαγωγή του πειράματος.

Σε αυτό το πλαίσιο χρησιμοποιήθηκε μια μηχανή υδροκοπής και πραγματοποιήθηκαν τομές στα δοκίμια (χάλυβας TRIP) με όλο το φάσμα των λειτουργικών δυνατοτήτων της. Από τα πειράματα αυτά και με την χρήση κατάλληλου εργαστηριακού εξοπλισμού συλλέχθηκαν δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την στατιστική επεξεργασία και την στοχαστική μοντελοποίηση.

Στα στοχαστικά μοντέλα χρησιμοποιούνται εργαλεία στατιστικών ελέγχων σημαντικότητας και ακρίβειας για να πιστοποιηθεί η εγκυρότητα και η πιστότητά τους. Παράλληλα εξετάζεται η ικανότητα των μοντέλων αυτών να εντοπίζουν τις περιοχές που αποκλίνουν από την επιθυμητή συμπεριφορά, έτσι ώστε με στατιστικές μεθόδους να καταρτιστούν ακριβέστερα μοντέλα βελτιώνοντας τα αρχικά.

Επιλέγοντας τους κατάλληλους κατ' εκτίμηση παράγοντες διαμορφώνουμε το μοντέλο μας προκειμένου να ερμηνεύσουμε τον μηχανισμό επίδρασης των παραγόντων αυτών στην κοπή. Μέσω αυτής της γνώσης θα βελτιστοποιηθούν οι συνθήκες κατεργασίας ώστε να καταστεί η μέθοδος υδροκοπής πιο αποτελεσματική.

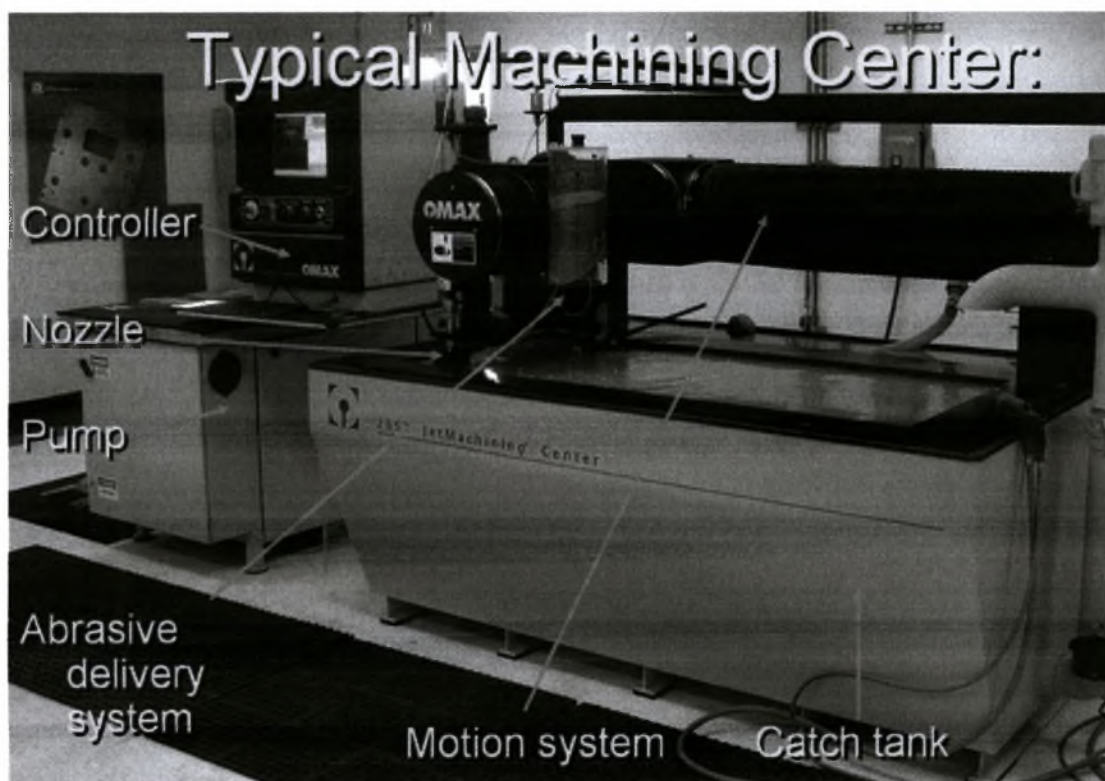
Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζονται περισσότερες λεπτομέρειες για την διεξαγωγή των πειραμάτων, τους παράγοντες, τις πειραματικές διατάξεις και μετρήσεις και κυρίως, για τις στατιστικές μεθόδους που ακολουθούνται κατά την στοχαστική μοντελοποίηση. Έπειτα, παραθέτονται και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης και τέλος παρουσιάζονται τα συνολικά συμπεράσματα της διατριβής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΥΔΡΟΚΟΠΗ ΣΕ ΧΑΛΥΒΑ TRIP

1.1 Γενικά

Την δεκαετία του 1960 μια Αμερικανική εταιρεία αεροδιαστημικής τεχνολογίας αντιμετώπισε την πρόκληση κοπής υλικών ενισχυμένων με ίνες άνθρακα και διμεταλλικών υλικών. Συμβατικές κατεργασίες κοπής κατέστρεφαν την δομή και έτσι δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν. Για να ξεπερασθεί αυτός ο σκόπελος έπρεπε να εφευρεθεί μια νέα μέθοδος κοπής. Έτσι η εταιρεία *Ingersoll-Rand* ανακάλυψε ότι δημιουργώντας υψηλή πίεση σε νερό και συγκεντρώνοντας το σε ένα ρεύμα υψηλής ταχύτητας μπορούσε να διαβρώσει και τελικά να κόψει, τόσο ιδιαιτέρως σκληρά όσο και μαλακά υλικά, χωρίς να καταστρέφει την δομή τους. Από τότε έως σήμερα η τεχνολογία αναπτύχθηκε και ωρίμασε και στην σημερινή της μορφή φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 1.1 Τυπικό σύστημα υδροκοπής

1.2 Τμήματα συστήματος υδροκοπής

Η τυπική εγκατάσταση για την κοπή με νερό υψηλής πίεσης (εικόνα 1.1) περιλαμβάνει τα παρακάτω βασικά στοιχεία:

- Υδραυλική αντλία υψηλής πίεσης
- Πολλαπλασιαστή (μεταθέτη) πίεσης, για την εξασφάλιση νερού σε πολύ υψηλή πίεση.
- Κεφαλή που φέρει ακροφύσιο (μπέκ) με πολύ μικρή διάμετρο.
- Σύστημα προσθήκης αποξεστικού μέσου*
- Κεντρικό πίνακα έλέγχου
- Σχαρωτό τραπέζι, για την πρόσδεση του υλικού που θα κατεργασθεί, αλλά και που επιτρέπει την εκτόνωση της δύναμης του νερού μετά την κοπή. Ακόμα διαθέτει σύστημα συλλογής, φιλτραρίσματος και ανακύκλωσης του νερού.
- Σύστημα κίνησης της κεφαλής κοπής σε δύο άξονες

** Το σύστημα αυτό υπάρχει μόνο σε εγκαταστάσεις αποξεστικής υδροκοπής*

1.2.1 Αντλία θετικών μετατοπίσεων

Για την επίτευξη πολύ υψηλής πίεσης η οποία είναι απαραίτητη για την υδροκοπή χρησιμοποιείται μια αντλία σε συνδυασμό με έναν πολλαπλασιαστή πίεσης (μεταθετής). Τόσο η αντλία όσο και ο πολλαπλασιαστής λειτουργούν κάτω από την ίδια αρχή. Κάθε ένα έχει ένα έμβολο, το οποίο ωθείται σε έναν κλειστό θάλαμο για να αυξήσει την πίεση και να αποβάλει το ρευστό μέσω μιας βαλβίδας εξόδου αντεπιστροφής.

Οι αντλίες ή αντλίες θετικών μετατοπίσεων όπως είναι το πλήρες όνομα τους λειτουργούν όπως μια μηχανή αυτοκινήτου με ακριβώς αντίθετη κατεύθυνση. Στην

άκρη του στροφαλοφόρου άξονα υπάρχουν έμβολα, τα οποία κινούνται (συνήθως από έναν ηλεκτροκινητήρα) για να δημιουργήσουν την προκαθορισμένη πίεση. Μόλις η πίεση φθάσει στην κρίσιμη τιμή η βαλβίδα εξόδου ανοίγει και το ρευστό εκρέει με υπερπίεση. Στο τέλος της διαδρομής του εμβόλου, και καθώς το έμβολο αντιστρέφει την κίνηση του, η βαλβίδα εισόδου (βαλβίδα αντεπιστροφής) ανοίγει και ο θάλαμος πληρώνεται με ρευστό. Τότε ο κινητήρας ωθεί το έμβολο ώστε το παγιδευμένο ρευστό που βρίσκεται στο θάλαμο να επανασυμπιεστεί και να αρχίσει ένας νέος κύκλος. Η απόδοση των αντλιών κυμαίνεται περίπου στο 95%. Το νερό πριν περάσει στην αντλία πρέπει οπωσδήποτε να φιλτραριστεί για να αποφευχθούν καταστροφικές ζημιές ή απόφραξη στην αντλία.



Εικόνα 1.2 Αντλία θετικών μετατοπίσεων

1.2.2 Πολλαπλασιαστής πίεσης

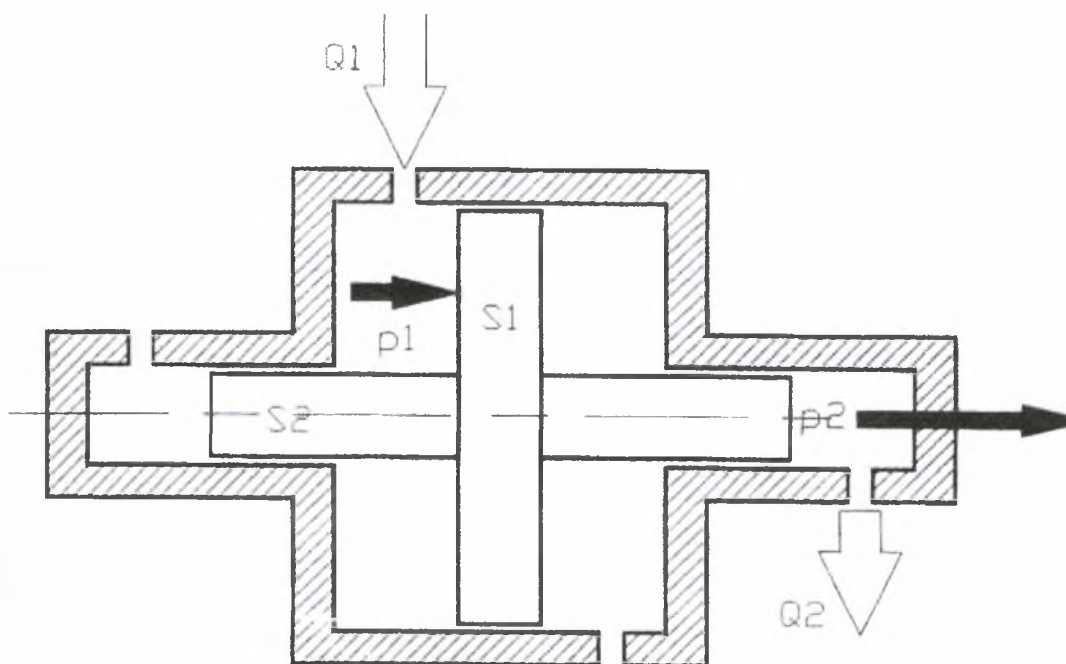
Ο πολλαπλασιαστής πίεσης αποτελείται από δύο ομοαξονικούς κυλίνδρους διαφορετικής διαμέτρου, το υδραυλικό λάδι, που προέρχεται από την αντλία (με πίεση p_1 και παροχή Q_1), πιέζει το μεγάλο κύλινδρο (διατομής S_1) και η δύναμη που προκύπτει διοχετεύεται στο μικρό κύλινδρο (διατομής S_2) και προκύπτει πίεση p_2 και παροχή Q_2 .

Έχουμε $F = p_1 \cdot S_1 = p_2 \cdot S_2$ επειδή η δύναμη στα δύο έμβολα είναι ίση. Στο

δευτερεύον κύκλωμα όμως κυκλοφορεί νερό και επειδή $S_2 < S_1 \Leftrightarrow p_2 > p_1$.

Λόγω του ότι ο πολλαπλασιαστής πίεσης λειτουργεί σε εναλλασσόμενη διεύθυνση, προκύπτουν αναπόφευκτες διακυμάνσεις πίεσης (στο σημείο αναστροφής της κίνησης του διπλού εμβόλου), παρεμβάλλεται στο κύκλωμα ένας αποσβεστήρας για τη μείωση τους. Ο πολλαπλασιαστής πίεσης έχει απόδοση που κυμαίνεται στο 70%.

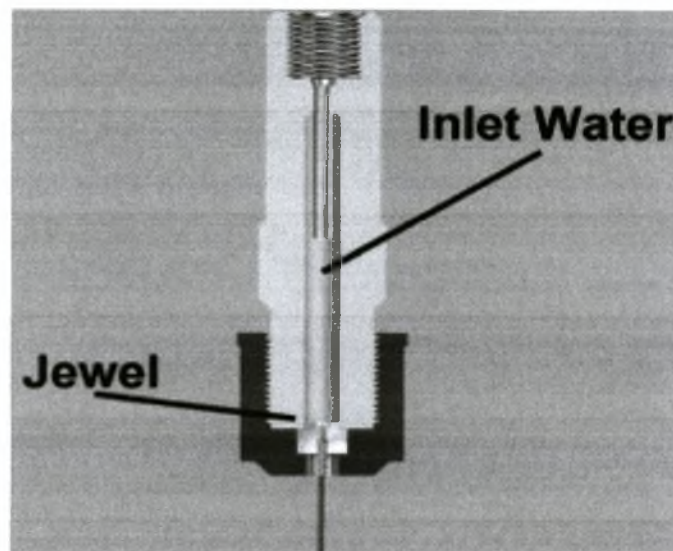
Καθοριστική για την απόδοση του συστήματος είναι η υψηλή πίεση, που διαθέτουμε στην έξοδο του ακροφυσίου, η οποία όπως έχει αναφερθεί, προκύπτει από την υψηλή πίεση που επιτυγχάνεται στην έξοδο του αποσβεστήρα, μείον τις απώλειες πίεσης στο κύκλωμα.



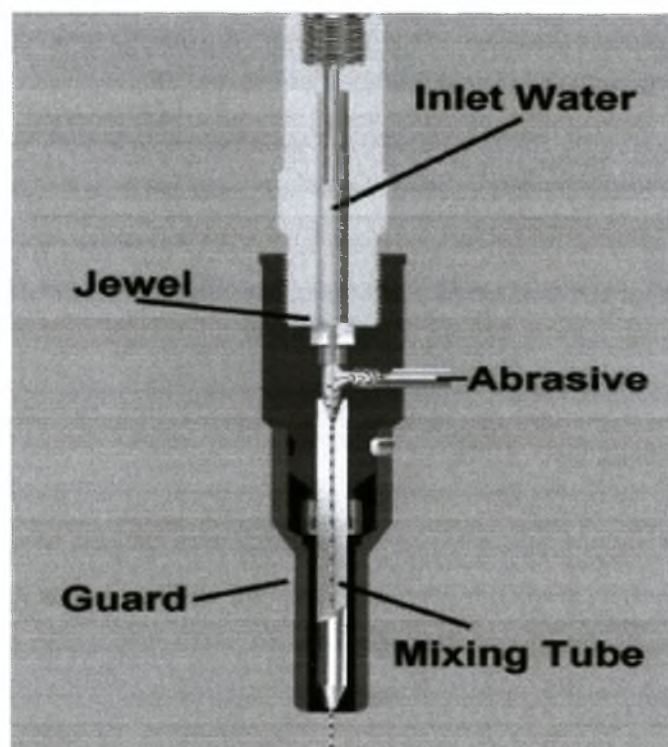
Εικόνα 1.3 Αρχή λειτουργίας πολλαπλασιαστή πίεσης

1.2.3 Κεφαλές κοπής

Υπάρχουν δύο μορφές υδροκοπής, αμιγώς ύδατος, και αποξεστική. Σε καθεμία περίπτωση, το νερό σε υπερπίεση περνά μέσω ενός στενού στομίου σε μια κεφαλή κοπής (ακροφύσιο) που τοποθετείται επάνω από το υλικό που κόβεται. Η διαφορά των 2 μορφών έγκειται στις διαφορετικές κεφαλές. Παρακάτω μπορούμε να δούμε τα 2 διαφορετικά είδη.



Εικόνα 1.4 Κεφαλή κοπής για σύστημα υδροκοπής αμιγούς ύδατος



Εικόνα 1.5 Κεφαλή κοπής για σύστημα αποξεστικής υδροκοπής

Η κεφαλή κοπής για το σύστημα υδροκοπής αμιγούς ύδατος (εικόνα 1.4) είναι πολύ πιο απλή σε σχέση με την αντίστοιχη της αποξεστικής (εικόνα 1.5). Σε αυτή μπορούμε να διακρίνουμε την εισαγωγή ύδατος και το ακροφύσιο (jewel). Το ακροφύσιο είναι το στόμιο από το οποίο το νερό βγαίνει για να διαμορφώσει το ρεύμα κοπής. Χαρακτηριστικά, υλικά από τα οποία κατασκευάζονται τα ακροφύσια είναι το ζαφείρι, το ρουμπίνι, το διαμάντι και καρβίδια (υλικά με πολύ μεγάλη αντοχή σε φθορά λόγω τριβής) και αυτό γιατί πρέπει να αντέχουν σε πολύ μεγάλες πιέσεις και τεράστιες δυνάμεις τριβής (λόγω των υλικών κατασκευής τους ονομάστηκαν "κόσμηματα"). Έχουν διάμετρο από 0.08 έως 2 mm και δημιουργούν πιέσεις έως και 640MPa (90,000psi).

Η κεφαλή κοπής για το σύστημα αποξεστικής υδροκοπής (εικόνα 1.5) έχει επιπλέον την είσοδο των αποξεστικών σωματιδίων . Τα σωματίδια αυτά εισάγονται σε μορφή κόκκων και μπορεί να είναι υλικά, όπως γρανίτης, καρβίδια ανθρακοκυριτίου ή οξειδία αλουμινίου. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αύξηση της δυναμικότητας της μεθόδου τόσο γιατί αυξάνεται η ταχύτητα κοπής, όσο και η δυνατότητα κοπής υλικών με αυξημένη σκληρότητα. Τα συστήματα αποξεστικής υδροκοπής μπορούν να κόψουν σχεδόν τα πάντα. Σε αυτήν την διαδικασία τα σωματίδια τριβής, που είναι συνήθως από γρανίτη, παρασύρονται από το ρεύμα ύδατος με την βοήθεια ενός σωλήνα *Venturi* (θάλαμος ανάμιξης). Μόνο περίπου 60% των σωματιδίων τριβής συμβάλει πραγματικά στην κοπή. Το υπόλοιπο των σωματιδίων εκρέει αχρησιμοποίητο και συλλέγεται στο σύστημα φιλτραρίσματος. Το ποσοστό των σωματιδίων τριβής που συμβάλει στην κοπή επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Γενικά, η αυξανόμενη ταχύτητα κοπής αυξάνει τον αριθμό μορίων που πραγματικά κόβει αλλά μειώνει το πάχος του υλικού που μπορεί να κοπεί.

1.2.4 Κεντρικός πίνακας ελέγχου και τραπέζι κοπής

Η εγκατάσταση διαθέτει κεντρικό πίνακα ελέγχου, όπου εκτός από τον αριθμητικό έλεγχο των κινήσεων της κεφαλής, γίνεται επιτήρηση της μονάδας παραγωγής Υ.Π. της στεγανότητας της εγκατάστασης, έλλειψης λαδιού ή νερού, θερμοκρασίας κ.λπ.

με τη βοήθεια κατάλληλων αισθητήρων που βρίσκονται σε επίκαιρα σημεία..

Τα κομμάτια που θα κοπούν τοποθετούνται και συγκρατούνται πάνω στο τραπέζι. Έως εδώ υπάρχει ομοιότητα με μια τυπική εργαλειομηχανή. Υπάρχει όμως και πρόσθετη απαίτηση για εκτόνωση της δύναμης του νερού μετά την κοπή.

Αυτό επιτυγχάνεται διαμορφώνοντας το τραπέζι σε σχάρα και με την προσθήκη ειδικής διάταξης, που απορροφά την υπόλοιπη πίεση του νερού. Άλλο στοιχείο είναι ότι, επειδή δεν έχουμε μεγάλες πλευρικές δυνάμεις, δεν είναι απαραίτητος ιδιαίτερα στιβαρός μηχανισμός συγκράτησης του κομματιού.

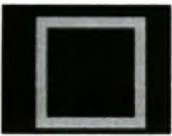

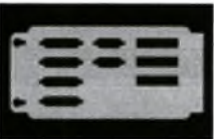



Η κατεργασία ανήκει στην κατηγορία κατεργασιών της κοπής (όπως με ένα πριόνι) και όχι διάτμησης (όπως με ψαλίδι), επειδή το υλικό αφαιρώντας αφήνοντας ένα στενό αυλάκι, τον αρμό κοπής.

1.2.5 Παράμετροι υδοκοπής

Οι παράμετροι που αφορούν την κοπή με νερό υψηλής πίεσης (με ή χωρίς σωματίδια τριβής) είναι τα παρακάτω μεγέθη:

- Η πίεση του νερού σε Μpa. Διακρίνουμε την πίεση σε πίεση εξόδου και πίεση αποσβεστήρα .
- Η διάμετρος του ακροφυσίου σε mm.
- Η απόσταση της κεφαλής από το υλικό σε mm.
- Η ταχύτητα κοπής (ταχύτητα κίνησης της κεφαλής) σε mm/min.
- Το πλάτος του αρμού κοπής σε mm.
- Η παροχή νερού Q σε L/min
- Το είδος και η παροχή του λειαντικού σε gr / min.

Παρακάτω παρατίθεται δύο ενδεικτικοί πίνακας που μας δείχνουν της δυνατότητα κοπής διάφορων υλικών με νερό υψηλής πίεσης και σωματίδια τριβής:

Φωτογραφία	Περιγραφή	Εκτιμώμενος χρόνος κοπής
	Πλαίσιο 63X63mm κομμένο από μαλακό χάλυβα πάχους 12mm	5 λεπτά
	Ίδιο πλαίσιο κομμένο από μαλακό χάλυβα πάχους 76mm	2.25 ώρες
	Ορθογώνιο κομμάτι 200X50mm κομμένο από μαλακό χάλυβα πάχους 1.5mm	1-3 λεπτά
	Γρανάζι διαμέτρου 75mm κομμένο από μαλακό χάλυβα πάχους 25 mm	1.25 λεπτά
	Αντικείμενο 25X25cm κομμένο από τιτάνιο πάχους 25	22 λεπτά
	Άλογο ύψους 18cm κομμένο από αλουμίνιο πάχους 6mm	4.8 λεπτά

Πίνακας 1.1 Εκτιμώμενος χρόνος για κοπή με νερό υψηλής πίεσης

ΥΛΙΚΟ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΠΑΧΟΣ (mm)	ΥΛΙΚΟ	ΜΕΓΙΣΤΟ ΠΑΧΟΣ (mm)
Χάλυβας	100	Χάλυβας με επικάλυψη	80
Αλουμίνιο	100	Γρανίτης	100
Μάρμαρο	80	Πλακάκια	50
Συνθετικές ύλες	100	Γυαλί	65
Πλεξιγκλάς	30	Αφρολέξ	250

Πίνακας 1.2 Παράμετροι υδροκοπής

1.3 Δυνατότητες υδροκοπής

Σε κάθε περίπτωση όμως, μία μέθοδος κοπής δεν καλύπτει όλα τα είδη των υλικών καθώς και την πληθώρα των μορφών που είναι δυνατόν να επιτευχθούν. Έτσι, κάθε κατασκευαστικό πρόβλημα επιδέχεται περισσότερες της μιας επιλογές. Η επιλογή μεθόδου κατεργασίας στις μηχανουργικές κατασκευές είναι μια επίπονη διαδικασία και αυτό γιατί πρέπει να ληφθεί υπόψη ένας αρκετά μεγάλος αριθμός από επιμέρους κριτήρια. Ορισμένα από αυτά είναι:

- Η μηχανική καταπόνηση.
- Η θερμική καταπόνηση
- Η φθορά του κοπτικού.
- Η ταχύτητα κοπής.
- Η ποιότητα επιφανείας του αρμού κοπής
- Η ικανότητα κοπής περίπλοκων σχημάτων.
- Το είδος του υλικού.
- Το κόστος της μηχανής.
- Το κόστος της κοπής.
- Το παραγόμενο απόβλητο και η δυνατότητα συλλογής του.
- Η ευχέρεια συνεργασίας του μηχανήματος με τα υπάρχοντα μηχανήματα της παραγωγικής διαδικασίας.
- Το επίπεδο δυσκολίας ή ευκολίας χειρισμού καθώς και το επίπεδο ασφάλειας αυτού.
- Η δυνατότητα ψηφιακής καθοδήγησης και η δυνατότητα συνεργασίας με ρομπότ.
- Η δυνατότητα κοπής εξίσου αποδοτικά σε δύο ή τρεις άξονες.

Για να γίνουν πιο εύκολα αντιληπτές οι δυνατότητες της υδροκοπής θα παραθέσουμε παρακάτω τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα αλλά και θα συγκρίνουμε την υδροκοπή με τις ανταγωνίστηκες προς αυτήν μεθόδους (κατεργασία με λείζερ, ηλεκτροδιάβρωση, κοπή φλόγας, τórνευση και πρεσάρισμα)

1.3.1 Πλεονεκτήματα υδροκοπής

Μερικά από τα πλεονεκτήματα της χρήσης κοπής με νερό υψηλής πίεσης είναι τα παρακάτω:

- Είναι σχετικά φθηνή μέθοδος .
- Έχει την δυνατότητα να κόβει σχεδόν οποιοδήποτε υλικό
 - Χάλυβες που έχουν υποστεί διαδικασίες σκλήρυνσης
 - Μαλακούς χάλυβες
 - Εξαιρετικά σκληρά υλικά όπως τιτάνιο, Inconel, Hastalloy
 - Ανοξείδωτους χάλυβες (304)
 - Οι περισσότεροι χάλυβες κόβονται με την ίδια ταχύτητα, είτε έχουν υποστεί διαδικασίες σκλήρυνσης, είτε όχι.
 - Χαλκός, ορείχαλκος, αργίλιο
 - Εύθραυστα υλικά όπως το γυαλί, κεραμικά, χαλαζίας, πέτρα.
 - Ελάσματα
- Δεν υπάρχει περιορισμός αν το υλικό είναι εύφλεκτο ή όχι.
- Δημιουργεί πολλαπλές μορφές με μόνο ένα εργαλείο.
- Μπορεί να κόψει σε ένα ευρύ φάσμα πάχους ελασμάτων, με πολύ καλή διαστατική ακρίβεια, από μερικά mm έως και 5cm (2 "), μέχρι 127mm (5 ") ή και μεγαλύτερου πάχους όπου η διαστατική ακρίβεια δεν είναι σημαντική, ή το υλικό είναι πολύ μαλακό.
- Κατά την κοπή δεν εκλύεται θερμότητα έτσι δεν έχουμε μεταβολές στην κρυσταλλική δομή και θερμικά παραγόμενες παραμένουσες τάσεις.
- Δεν έχουμε μηχανικές καταπονήσεις.
- Δεν υπάρχει σχεδόν κανένας περιορισμός στη γεωμετρική μορφή που πρέπει να δημιουργηθεί.
- Γρήγορη προετοιμασία της εργαλειομηχανής και των συσκευών.
- Μεγάλη ευελιξία, παρέχεται η δυνατότητα κατεργασίας τόσο διαφορετικών υλικών όσο και γεωμετρικών μορφών χωρίς καμία τροποποίηση του μηχανήματος.

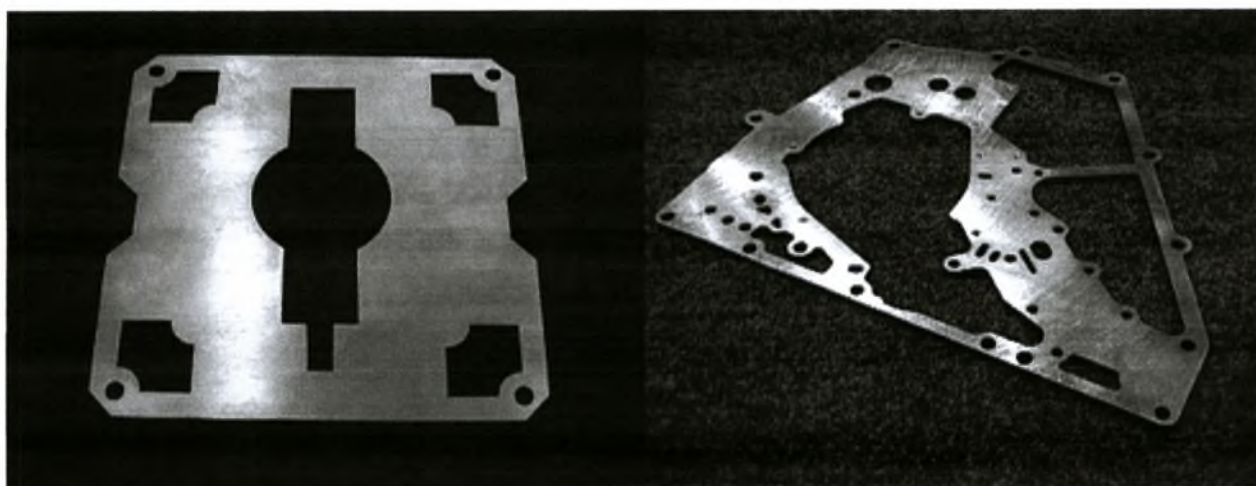
- Δεν αφήνει υπολείμματα κοπής (ακρόγρεζο), μειώνοντας έτσι τις δευτεροβάθμιες κατεργασίες .
- Είναι φιλική προς το περιβάλλον, δεν χρησιμοποιεί βοηθητικά λιπαντικά και δεν παράγει επικίνδυνα ή επιβλαβή αέρια.
- Δεν χρειάζεται να έχει γίνει πρωταρχική οπή για να ξεκινήσει η υδροκοπή
- Η κοπή επιτυγχάνεται με την δημιουργία ενός μικροσκοπικού αύλακα, του αρμού κοπής, με αποτέλεσμα να αφαιρείται ελάχιστο υλικό .
- Το υλικό που αφαιρείται (απόβλητο) είναι ευκολότερο να συλλεχθεί και να ανακυκλωθεί.
- Τα σύγχρονα συστήματα υδροκοπής είναι πολύ εύκολα στον χειρισμό.
- Υπάρχει η δυνατότητα (ανάλογα με τις εκάστοτε κατασκευαστικές απαιτήσεις) να αυξήσουμε την ταχύτητα παραγωγής εις βάρος της διαστατικής ακρίβειας και το αντίστροφο .
- Το ίδιο σύστημα μπορεί να καλύψει ανάγκες μαζικής παραγωγής ή μη .
- Είναι πολύ ασφαλής. (Το νερό είναι πρακτικά ασυμπίεστο, έτσι δεν έχουμε τυχόν εκρήξεις)
- Δεν είναι απαραίτητος ιδιαίτερα στιβαρός μηχανισμός συγκράτησης του κομματιού εξαιτίας των χαμηλών δυνάμεων κοπής, ενώ ταυτόχρονα είναι πολύ εύκολη η τοποθέτηση και η απομάκρυνση του.
- Είναι δυνατόν να κόψουμε αντικείμενα που βρίσκονται σε προχωρημένο στάδιο επεξεργασίας (π.χ. φινίρισμα) και έχουν υποστεί ισχυροποίηση (π.χ. εργοσκλήρυνση) χωρίς να υποβαθμισθεί η μέχρι πρότινος ποιότητα τους.



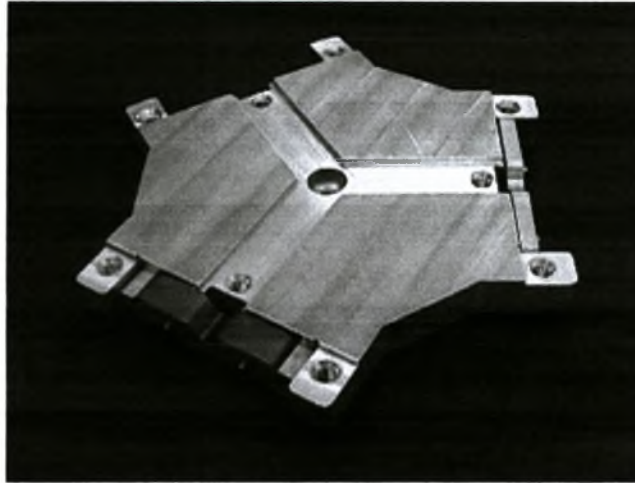
Εικόνα 1.6 Κατεργασία ακρίβειας η οποία ασφαλίζει τέλεια συναρμογή.



Εικόνα 1.7 Δημιουργία πολύπλοκων γεωμετρικών μορφών με υδροκοπή



Εικόνα 1.8 Κοπή ελασμάτων



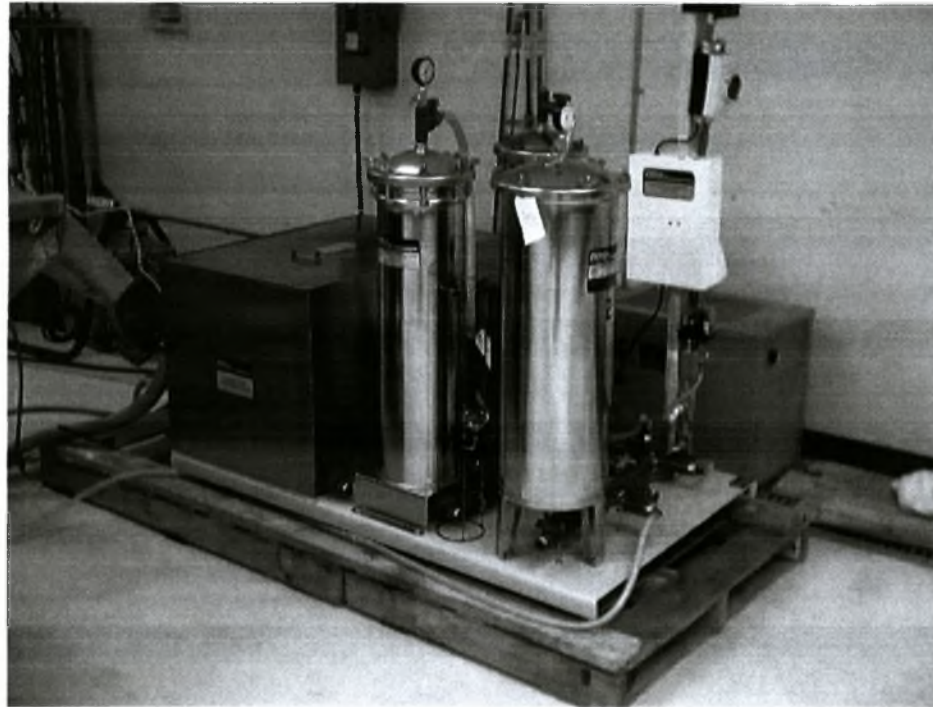
Εικόνα 1.9 Κομμάτι που επεξεργάστηκε με νερό υψηλής πίεσης ενώ βρισκόταν στο τελικό στάδιο κατασκευής του.

1.3.2 Μειονεκτήματα υδροκοπής

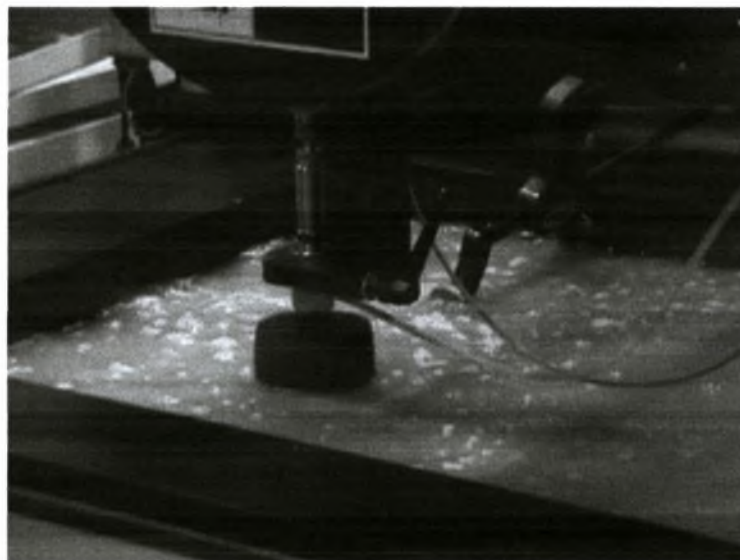
Μερικά από τα μειονεκτήματα της χρήσης κοπής με νερό υψηλής πίεσης είναι τα παρακάτω:

- Για να εγκατασταθεί ένα σύστημα υδροκοπής απαιτείται υψηλό αρχικό κεφαλαίο.
- Η υδροκοπή υστερεί σημαντικά σε τρισδιάστατες κατεργασίες.
- Καθώς η τρίτη διάσταση του κατεργαζόμενου κομματιού (πάχος) αυξάνει, η απόδοση της μεθόδου μειώνεται σημαντικά.
- Το ακροφύσιο και ο θάλαμος ανάμειξης υπόκεινται σε μεγάλες καταπονήσεις και λόγω της αναπόφευκτης φθοράς έχουν περιορισμένο χρόνο ζωής
- Οι αντλίες υψηλής πίεσης απαιτούν νερό υψηλής ποιότητας, γι' αυτό το νερό πρέπει να προεπεξεργάζεται.
- Οι αντλίες χρειάζονται συχνά συντήρηση (κάθε 1000 ώρες λειτουργίας).
- Σε μερικές περιπτώσεις δημιουργείται πολύ υψηλός θόρυβος (πάνω από 80dB).

- Η καλή απόδοση του συστήματος βασίζεται στην σωστή επιλογή της ταχύτητας κοπής, του τύπου ακροφυσίου, της απόστασης κοπής καθώς και της πίεσης εξόδου



Εικόνα 1.10 Σύστημα διήθησης κλειστού βρόγχου, απαραίτητο τμήμα ενός συστήματος υδροκοπής.

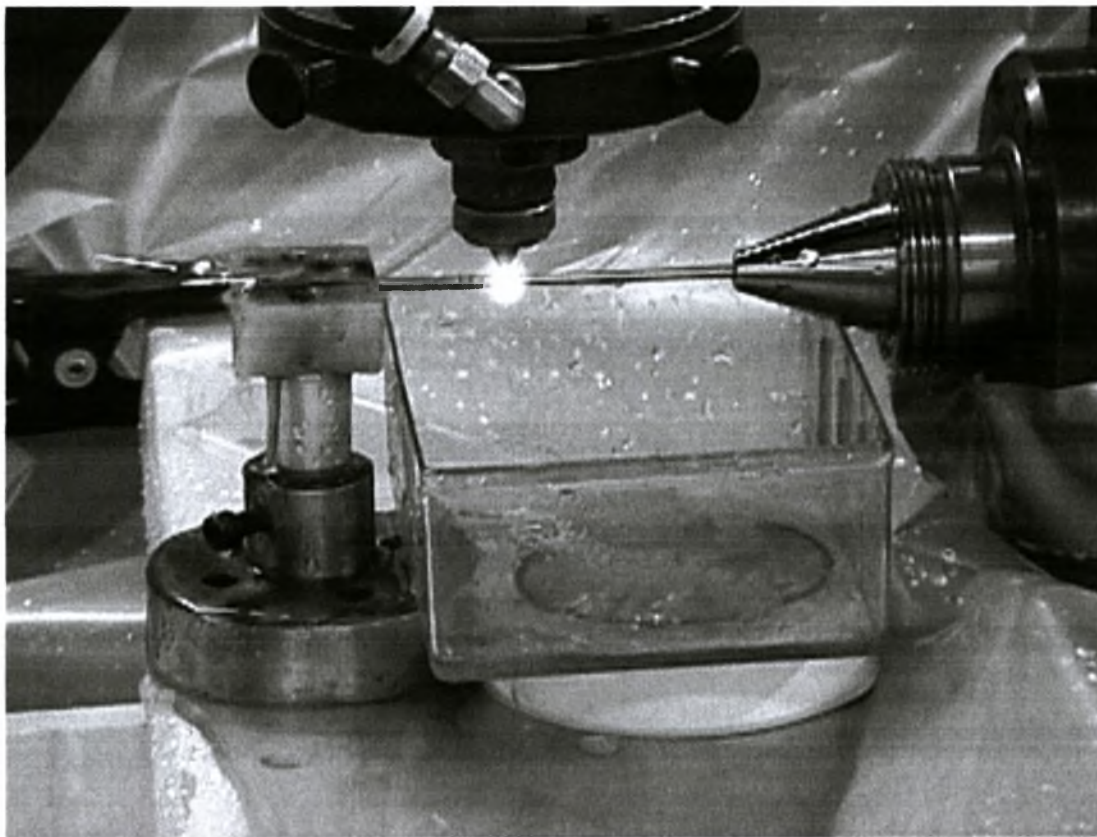


Εικόνα 1.11 Κοπή κάτω από την επιφάνεια του νερού σε προσπάθεια μείωσης του προκαλούμενου θορύβου.

1.3.3 Σύγκριση υδροκοπής και λείζερ

- Η υδροκοπή μπορεί να επεξεργαστεί μεγαλύτερο εύρος υλικών υψηλής ανακλαστικότητας όπως το αλουμίνιο και ο χαλκός αποκλείονται από την κατεργασία με λείζερ.
- Η ομοιομορφία του υλικού δεν είναι τόσο σημαντική για την υδροκοπή.
- Κατά την υδροκοπή δεν θερμαίνεται το επεξεργαζόμενο κομμάτι, κατά συνέπεια δεν υπάρχει καμία θερμική στρέβλωση ή σκλήρυνση του υλικού.
- Η διαστατική ακρίβεια στην υδροκοπή είναι πανομοιότυπη η ακόμα και καλύτερη από το λείζερ (σε μεσαία και μεγάλα πάχη).
- Οι δαπάνες κύριου εξοπλισμού για την υδροκοπή είναι γενικά πολύ χαμηλότερες από τις αντίστοιχες για ένα λείζερ (το κόστος ενός λείζερ είναι υπερδιπλάσιο).
- Το μέγιστο πάχος κομματιού που μπορεί να κοπεί με λείζερ κυμαίνεται από 12-19mm σε αντίθεση με την υδροκοπή που η κατεργασία κομματιών χάλυβα πάχους 50mm ή αλουμινίου 70mm είναι συνήθης . Το πάχος των κομματιών που μπορούν να κατεργασθούν με υδροκοπή είναι θεωρητικά τουλάχιστον απεριόριστο, όμως η αύξηση του χρόνου κατεργασίας και η μείωση της διαστατικής ακρίβειας καθιστούν την μέθοδο οικονομικά ασύμφορη για κομμάτια πολύ μεγάλου πάχους.
- Τα λείζερ είναι περισσότερο ανθεκτικά και έχουν λιγότερες απαιτήσεις συντήρησης, οι οποίες όμως είναι πολύ πιο πολύπλοκες και χρονοβόρες.
- Η υδροκοπή είναι πιο αποτελεσματική σε επιφάνειες μεγάλης τραχύτητας.
- Το λείζερ έχουν υψηλότερη παραγωγικότητα.
- Κατά την κοπή με λείζερ δημιουργούνται πολλές φορές αέρια επιβλαβή, τόσο για το περιβάλλον όσο και για τους εργαζομένους, ενώ η υδροκοπή δεν αντιμετωπίζει κανένα τέτοιο πρόβλημα.
- Η λειτουργία ενός συστήματος λείζερ προϋποθέτει προσωπικό με υψηλή κατάρτιση, αντίθετα με ένα σύστημα υδροκοπής που η λειτουργία είναι απλούστερη.

- Η ποιότητα της επιφάνειας κοπής είναι καλύτερη όταν η κοπή έχει γίνει με σύστημα νερού υψηλής πίεσης. Έτσι διευκολύνονται δευτερεύουσες κατεργασίες όπως η συγκόλληση.
- Το λέιζερ εξασφαλίζει διαστατική ακρίβεια σε αντίθεση με την υδροκοπή.(βαθμιαία φθορά του ακροφυσίου).



Εικόνα 1.12 Κατεργασία με ακτίνα λέιζερ

1.3.4 Σύγκριση υδροκοπής και ηλεκτροδιάβρωσης.

- Η υδροκοπή επιτυγχάνει μεγαλύτερες ταχύτητες κοπής (έως και δέκα φορές), συνεπώς έχει μεγαλύτερη παραγωγικότητα από την ηλεκτροδιάβρωση
- Τα συστήματα κοπής με νερό υψηλής πίεσης έχουν μεγαλύτερο φάσμα υλικών που μπορούν να επεξεργασθούν, η ηλεκτροδιάβρωση αδυνατεί να επεξεργασθεί μη αγώγιμα υλικά.
- Η ομοιομορφία του υλικού δεν είναι τόσο σημαντική για την υδροκοπή.

- Στην υδροκοπή δεν χρειάζεται να έχει γίνει αρχική οπή για να ξεκινήσει η κοπή.
- Η υδροκοπή δεν ευνοεί την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών, κατά συνέπεια δεν υπάρχει καμία θερμική στρέβλωση ή σκλήρυνση του υλικού..
- Οι ατέλειες στην δομή του υλικού δεν είναι τόσο σημαντικές για την υδροκοπή.
- Η ηλεκτροδιάβρωση έχει πολύ καλύτερη διαστατική ακρίβεια από τη υδροκοπή. Στην υδροκοπή η ακρίβεια κυμαίνεται $\pm 0.075\text{mm}$ ενώ στη ηλεκτροδιάβρωση $\pm 0.0024\text{mm}$).
- Η υδροκοπή απαιτεί μικρότερο χρόνο προετοιμασίας.
- Η ηλεκτροδιάβρωση είναι πιο αποτελεσματική σε κομμάτια με μεγάλα πάχη (150mm και άνω).

1.3.5 Σύγκριση υδροκοπής και κοπής με πλάσμα.

- Η υδροκοπή έχει μεγαλύτερο εύρος υλικών που μπορεί να επεξεργαστεί. Η κοπή με πλάσμα δεν μπορεί να επεξεργασθεί εύφλεκτα υλικά.
- Κατά την κοπή με πλάσμα εκλύεται θερμότητα, έτσι έχουμε μεταβολές στην κρυσταλλική δομή και παραμένουσες τάσεις.
- Το πλάσμα μας δίνει κακή ποιότητα στην επιφάνεια κοπής αυξάνοντας έτσι τις δευτεροβάθμιες κατεργασίες.
- Η υδροκοπή έχει μεγαλύτερη διαστατική ακρίβεια.
- Η κοπή με πλάσμα πετυχαίνει μεγαλύτερες ταχύτητες κοπής με αποτέλεσμα να έχει μεγαλύτερη αποδοτικότητα.

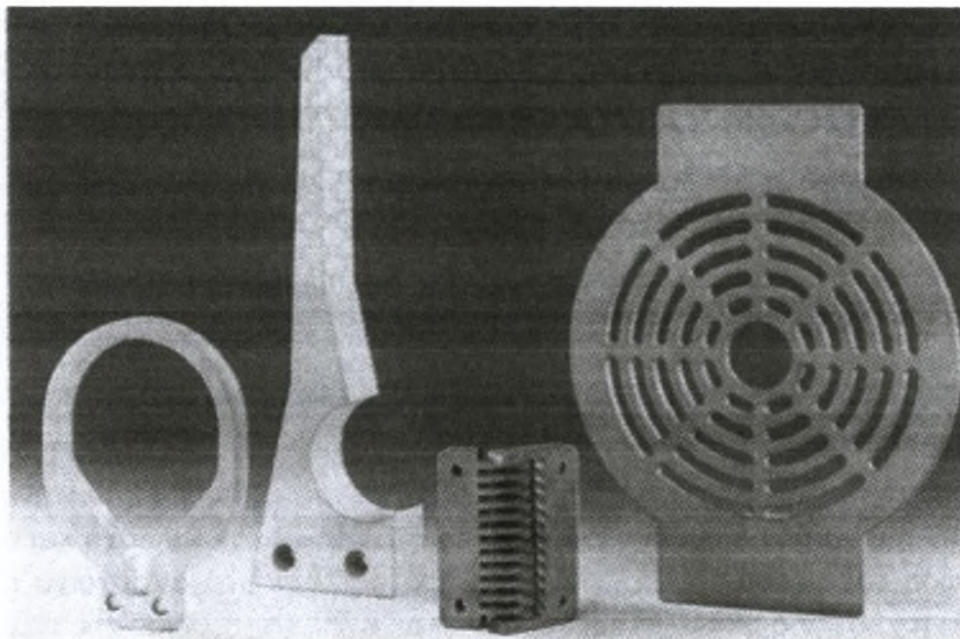
1.3.6 Σύγκριση υδροκοπής και κοπής με τórνευση.

- Η τórνευση απαιτεί συχνή αλλαγή κοπτικών εργαλείων λόγω φθοράς , διαδικασία αρκετά χρονοβόρα.
- Η υδροκοπή έχει πολύ μικρότερο χρόνο προετοιμασίας.
- Ο προγραμματισμός της τórνευσης είναι πιο δύσκολος και πιο χρονοβόρος.

1.4 Εφαρμογές κοπή με νερό υψηλής πίεσης

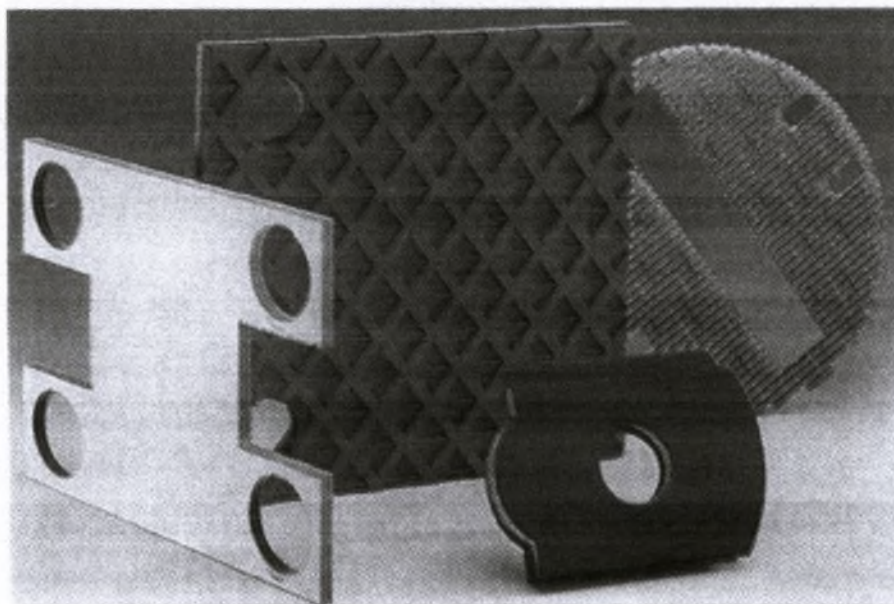
Όπως έχει προαναφερθεί η υδροκοπή είναι μια πολύ ευέλικτη μέθοδος και μπορεί να επεξεργασθεί ένα ευρύ φάσμα υλικών. Παρακάτω μπορούμε να δούμε κάποιες από αυτές τις εφαρμογές (εικόνα 1.13 Α-ΣΤ):

- **Μέταλλα και κράματα μετάλλων**
 - Χάλυβες απλοί και ανοξείδωτοι
 - Ορείχαλκος



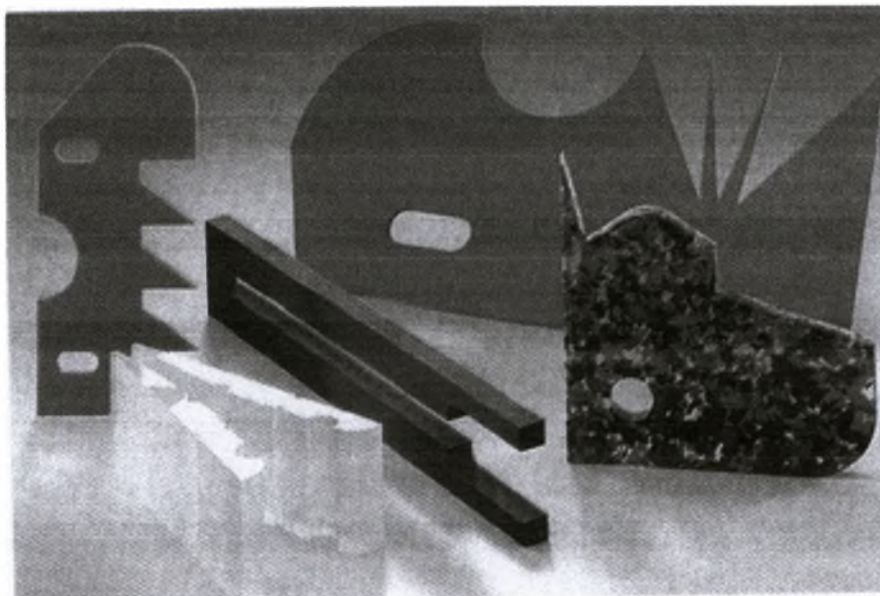
Εικόνα 1.13 Α

- **Σύνθετα και κυψελωτά υλικά**
 - Φύλλα τυπωμένων κυκλωμάτων
 - Κράματα Al (π.χ. *Alucobond*)
 - Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες



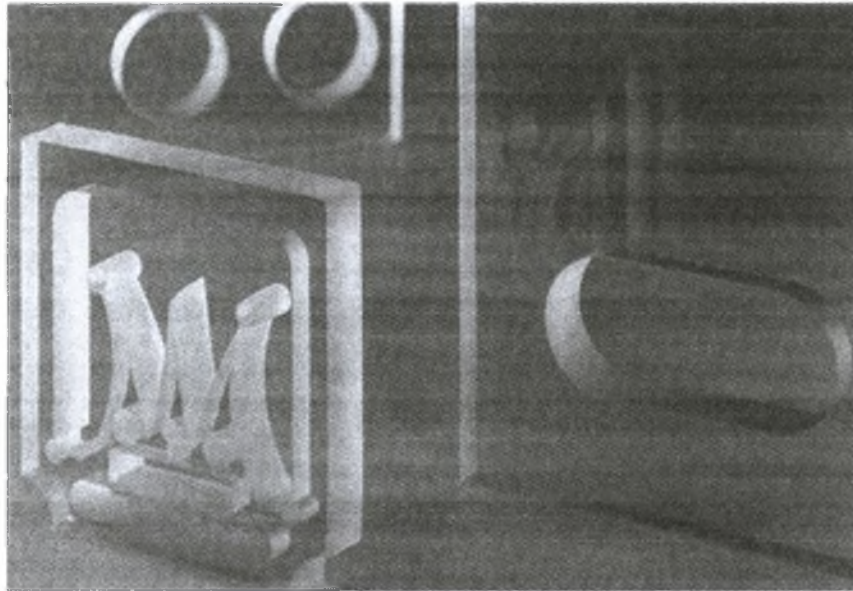
Εικόνα 1.13 Β

- Πλαστικά
 - ο Μαλάκα ή σπογγώδη πλαστικά
 - ο Πλεξιγκλάς



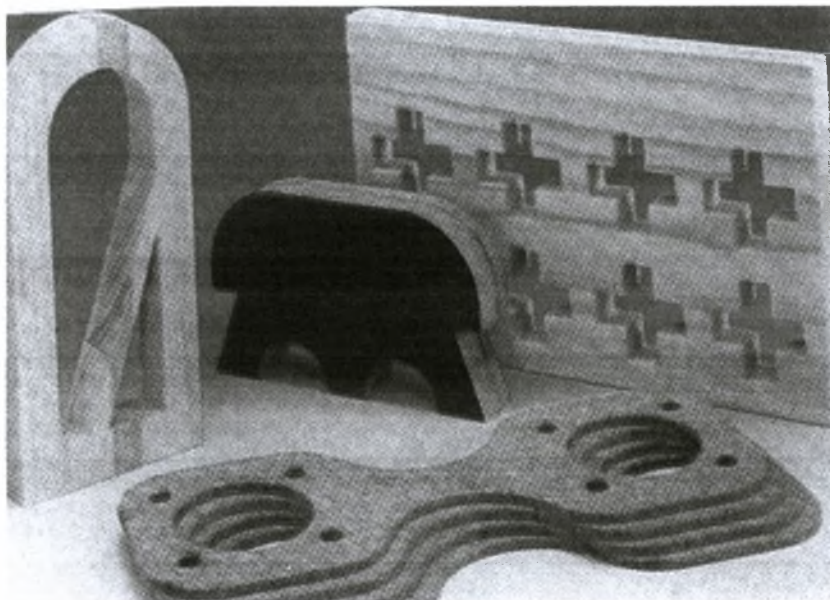
Εικόνα 1.13 Γ

- **Γυαλί**
 - Γυαλί πολλαπλών χρήσεων
 - Θωρακισμένο γυαλί
 - Ενισχυμένο γυαλί



Εικόνα 1.13 Δ

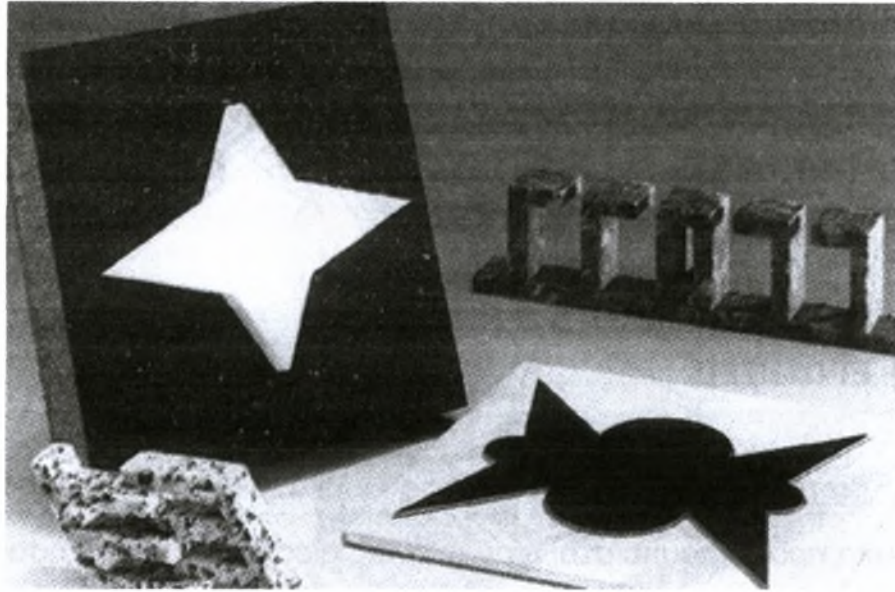
- **Ξύλο**
 - Όλα τα φυσικά είδη ξύλου
 - Πεπιεσμένο ξύλο (νοβοπάν)
 - Φελλός



Εικόνα 1.13 Ε

- **Ορυκτά και κεραμικά υλικά**

- ο Μάρμαρο
- ο Γρανίτης
- ο Κεραμικά υλικά

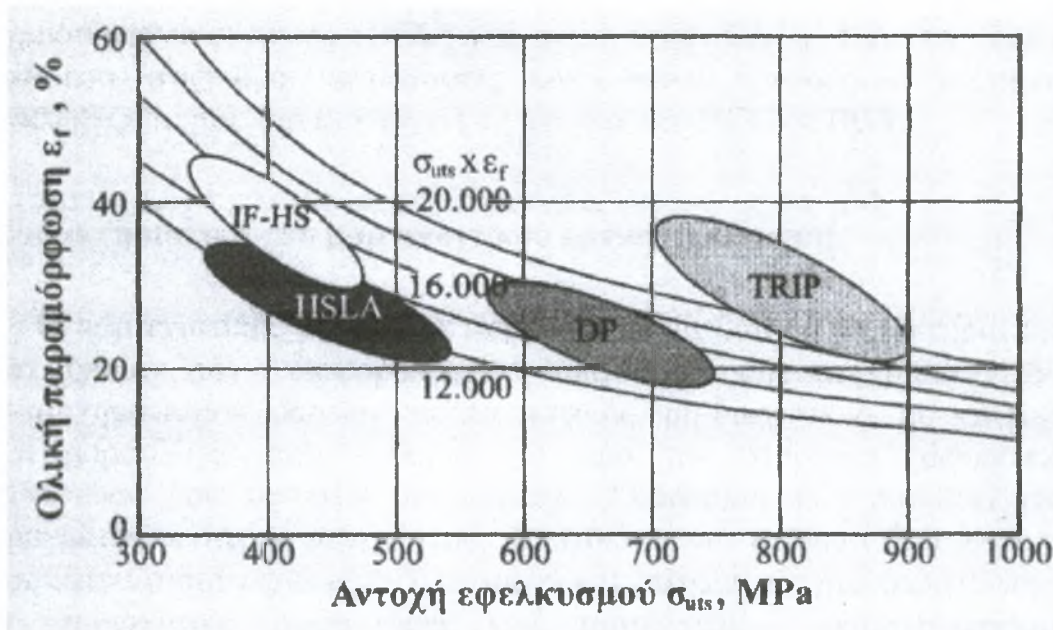


Εικόνα 1.13 ΣΤ

1.5 Χάλυβας TRIP

Στην παρούσα διπλωματική πραγματευόμαστε την κοπή χάλυβα TRIP με νερό υψηλής πίεσης. Οι χάλυβες TRIP αποτελούν μία νέα βελτιωμένη κατηγορία χαλύβων η οποία αναπτύχθηκε για να ικανοποιήσει τις ανάγκες της σύγχρονης βιομηχανίας (αυτοκινητοβιομηχανίας κυρίως) για εξοικονόμηση ενέργειας, μείωση βάρους, και βέλτιστη αντοχή. Η μικροδομή των χαλύβων αποτελείται από τουλάχιστον δύο συστατικά με αποτέλεσμα να μεγιστοποιείται η αντοχή του και ταυτόχρονα να μην επηρεάζεται η ολκιμότητά τους. Αυτοί οι πολυφασικοί χάλυβες προσφέρουν πολύ καλούς συνδυασμούς αντοχής-ολκιμότητας, οι οποίοι οφείλονται στη συνύπαρξη των φάσεων των διαφορετικών μικροδομών, τις διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες, και στον συνδυασμό των παραπάνω. Στην παρακάτω εικόνα μπορούμε να δούμε πως συγκρίνεται η αντοχή σε εφελκυσμό και η ολική παραμόρφωση των χαλύβων TRIP με άλλα ανταγωνιστικά κράματα, όπως τους χάλυβες υψηλής αντοχής και χαμηλής

κραμάτωσης (*HSLA*), τους χάλυβες διπλής φάσης (*DP*) και τους χάλυβες υψηλής αντοχής χωρίς στοιχεία παρεμβολής (*IF-HS*).

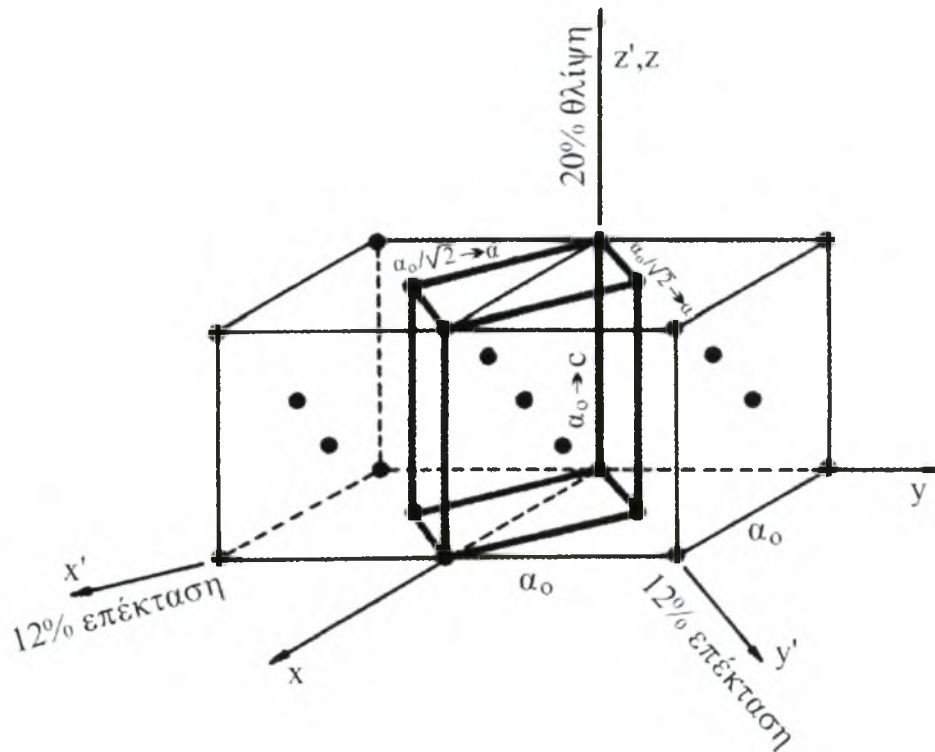


Εικόνα 1.14 Σύγκριση αντοχής εφελκυσμού-ολικής παραμόρφωσης για διάφορες κατηγορίες χαλύβων.

Οι χάλυβες *TRIP* (*Transformation Induced Plasticity*) εκμεταλλεύονται το φαινόμενο *TRIP* (πλαστικότητα μετασχηματισμού), από το οποίο άλλωστε προέρχεται και το όνομα τους. Κατά το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα η μετατροπή του παραμένουτος ωστενίτη σε μαρτενσίτη με πλαστική παραμόρφωση. Λόγω αυτής της μετατροπής προσδίδονται στους χάλυβες *TRIP* αυτοί οι εξαιρετικοί συνδυασμοί ιδιοτήτων. Η δομή τους αποτελείται κυρίως από φερρίτη, μπαινίτη και παραμένοντα ωστενίτη.

Το φαινόμενο *TRIP* (πλαστικότητα μετασχηματισμού) είναι μια ειδική κατηγορία μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. Κατά τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό λαμβάνουν χώρα δύο είδη παραμορφώσεων. Πρώτα πραγματοποιείται η ομοιόμορφη παραμόρφωση πλέγματος ή παραμόρφωση Bain όπου ο ωστενίτης (*FCC*) μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη (*BCC*) μία νέα φάση με τετραγωνική χωροκεντρωμένη δομή. Στη συνέχεια, επειδή το πλέγμα έχει παραμορφωθεί σημαντικά κατά το πρώτο στάδιο και έχουν αναπτυχθεί τάσεις στο κρυσταλλικό πλέγμα, ακολουθεί η παραμόρφωση αμετάβλητου επιπέδου (*invariant - plain strain*,

IPS) με την οποία μειώνονται οι τάσεις. Η παραμόρφωση *IPS* γίνεται είτε με ολίσθηση αταξιών, είτε με την δημιουργία διδυμίων.

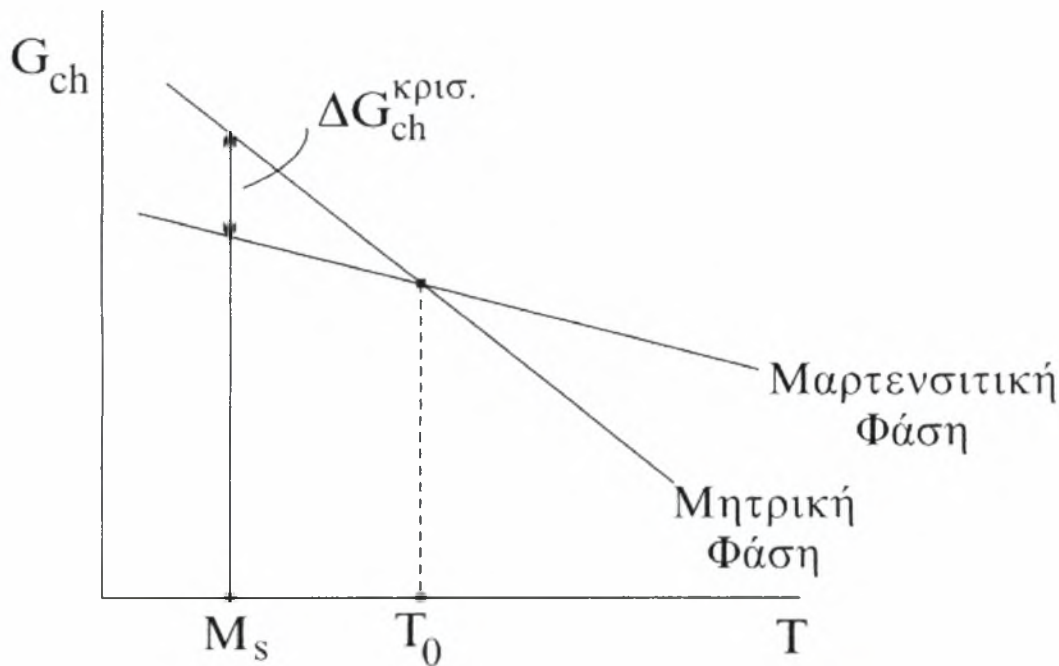


Εικόνα 1.15 Αντιστοιχία πλέγματος για τον μετασχηματισμό FCC-BCC στους χάλυβες.

Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός στους χάλυβες συνήθως πραγματοποιείται χωρίς θερμική ενεργοποίηση, δηλαδή κατά τη διάρκεια της ψύξης ανάμεσα σε ένα ζεύγος θερμοκρασιών που μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια για ένα χάλυβα με συγκεκριμένη σύσταση. Οι δύο θερμοκρασίες αυτές ονομάζονται M_s και M_f από τα αρχικά των λέξεων έναρξη (*start*) και λήξη (*finish*), αντίστοιχα. Η θερμοκρασία M_s μπορεί να κυμαίνεται από 500°C έως και κάτω από τη θερμοκρασία δωματίου. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην παρουσία κραματικών στοιχείων και στις συγκεντρώσεις τους στους χάλυβες. Αυτά είτε σταθεροποιούν τον ωστενίτη είτε όχι αυξομειώνοντας αντίστοιχα την M_s .

Η θερμοκρασία M_f αντιστοιχεί στην θερμοκρασία όπου σταματά ο μετασχηματισμός αλλά μερικές φορές αυτή είναι τόσο χαμηλή, ώστε ο μηχανισμός

δεν ολοκληρώνεται. Πολύ συχνά ένα ποσοστό του ωστενίτη δεν μετασχηματίζεται και ονομάζεται παραμένων ωστενίτης (*retained austenite*).

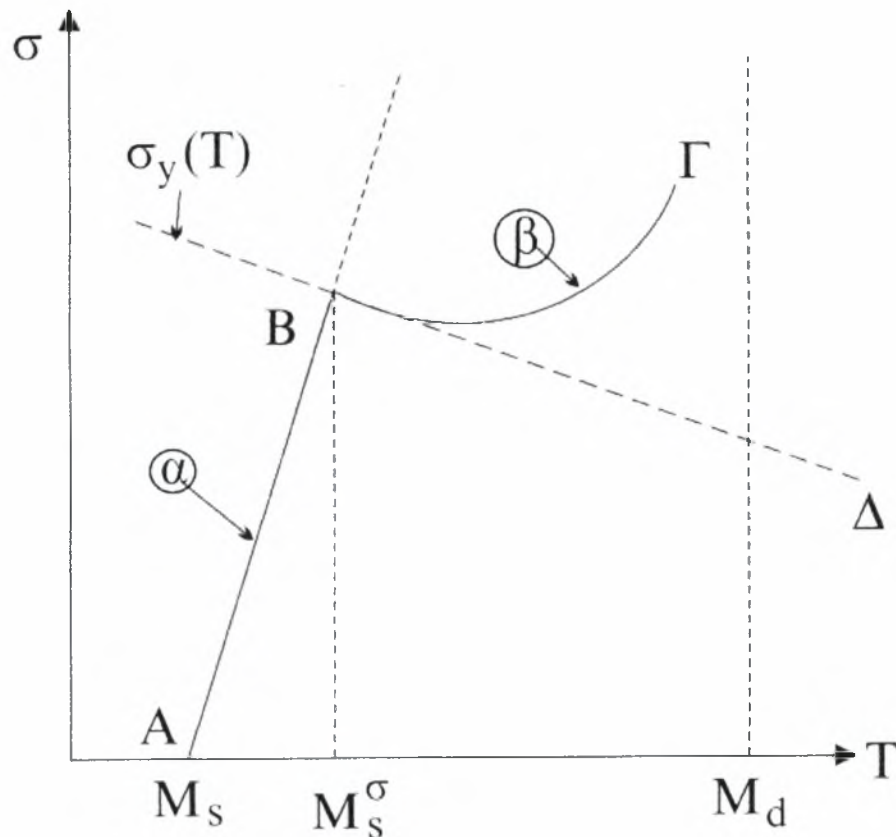


Εικόνα 1.16 Διάγραμμα καμπύλων ελεύθερης ενέργειας σε συνάρτηση με την θερμοκρασία για την μητρική (ωστενιτική) και μαρτενσιτική φάση. [4]

Στη θερμοκρασία T_0 η ελεύθερη ενέργεια των δύο φάσεων είναι ίση, $\Delta G^{ch}=0$ αλλά καθώς μειώνεται η θερμοκρασία η φάση με την μικρότερη ελεύθερη ενέργεια είναι ο μαρτενσίτης, οπότε και αναμένεται από τη θερμοδυναμική να γίνει ο μετασχηματισμός. Αυτό πραγματοποιείται μόλις μπορέσει να υπερνικηθεί το ενεργειακό φράγμα για την πυρήνωση του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, $\Delta G_{κρυσ}^{ch}$ το οποίο συμβαίνει στην θερμοκρασία M_s .

Το φαινόμενο TRIP (πλαστικότητα μετασχηματισμού) παρατηρείται όταν κατά τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό έχουμε μηχανικές επιδράσεις (παραμορφώσεις). Όπως φαίνεται και στην (Εικόνα 1.14), όταν η εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση φτάσει στην τιμή του ορίου ροής του ωστενίτη $\sigma_Y(Ms^0)$, ο ωστενίτης αρχίζει να ρέει πλαστικά. Η πλαστική παραμόρφωση αυτή γίνεται μέσω ολίσθησης αταξιών, οι οποίες κάποια στιγμή διασταυρώνονται δημιουργώντας νέες, πιο δυναμικές θέσεις πυρήνωσης. Γι' αυτό το λόγο η τάση που απαιτείται για μαρτενσιτική πυρήνωση δεν ακολουθεί την προέκταση της AB αλλά την BG. Η μαρτενσιτική πυρήνωση αυτή αποκαλείται επιβαλλόμενη από την τάση (Strain induced). Πάνω από την

θερμοκρασία M_d η χημική κινούσα δύναμη είναι τόσο μικρή που δεν μπορεί πλέον να γίνει πυρήνωση άσχετα με το μέγεθος της τάσης. Η μαρτενσιτική παραμόρφωση μορφής συνεισφέρει στον μηχανισμό παραμορφώσεως, που χαρακτηρίζεται έτσι πλαστικότητα μετασχηματισμού (*Transformation Induced Plasticity, TRIP*)



Εικόνα 1.17 Διάγραμμα μαρτενσιτικού μετασχηματισμού συναρτήση της θερμοκρασίας και της επιβαλλόμενης τάσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ

2.1 Γενικά

Κάθε τεχνολογικό αντικείμενο στο τελικό στάδιο της παραγωγής του έχει περάσει από μία σειρά κατεργασιών οι οποίες συνεπάγονται μηχανικές, θερμικές και ίσως χημικές δράσεις στην επιφάνεια του. Η κατεργασμένη επιφάνεια αποκτά ορισμένες νέες ιδιότητες και χαρακτηριστικά τα οποία συνιστούν την "ποιότητα επιφανείας". Ο όρος αυτός συμπεριλαμβάνει τόσο τα φυσικοχημικά όσο και τα μεταλλουργικά χαρακτηριστικά μιας επιφάνειας. Τα χαρακτηριστικά αυτά δεν τα είχε φυσικά η επιφάνεια προ της κατεργασίας, δηλαδή ως ακατέργαστη επιφάνεια. Οι μεταβολές που επέρχονται εν γένει σε ιδιότητες και χαρακτηριστικά με την κατεργασία, οφείλονται σε επιρροές, τόσο της κατεργασίας καθεαυτής όσο και του περιβάλλοντος με το οποίο κάθε νεοκατεργασμένη επιφάνεια του τεμαχίου έρχεται σε επαφή.

Έτσι η κατεργασμένη επιφάνεια αποκτά ιδιάζουσα τοπογραφία, ορισμένη ακρίβεια διαστάσεων και μορφής, ξεχωριστές ιδιότητες και χαρακτηριστικά τα οποία εκτείνονται σε ορισμένο βάθος στην επιφανειακή στοιβάδα του τεμαχίου.

Στην *εικόνα 2.1* μπορούμε να δούμε την κάθετη τομή μίας μεταλλικής επιφάνειας ύστερα από κατεργασία κοπής, όπου εκδηλώνεται έντονα και παραστατικά η επιρροή της κατεργασίας και του περιβάλλοντος με την δημιουργία επάλληλων κατά βάθος στρώσεων που χαρακτηρίζονται από διαφορετική «κατάσταση» (σύσταση, δομή, ιδιότητες). Λαμβάνουν δηλαδή χώρα αλλαγές, άλλες σε μικρό και άλλες σε μεγάλο βαθμό, τόσο από μηχανικές και χημικές επιδράσεις όσο και από κρυσταλλογραφικούς μετασχηματισμούς.



Εικόνα 2.1 Τομή μίας μεταλλικής επιφάνειας ύστερα από κατεργασία κοπής

Η ενδεδειγμένη για κάθε εφαρμογή ποιότητα των κατεργασμένων επιφανειών συντείνει αποφασιστικά στην αποδοτική λειτουργία και στην ασφάλεια εργασίας των συναφών τεμαχίων.

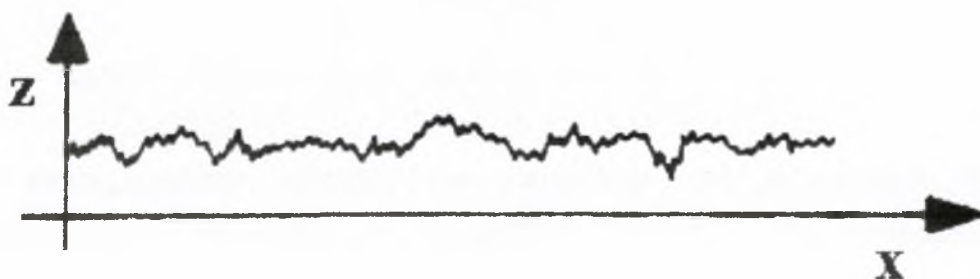
Γίνεται κατά συνέπεια, διάκριση μεταξύ ιδιοτήτων επιφάνειας και ιδιοτήτων όγκου ή εσωτερικών ιδιοτήτων του υλικού. Οι ιδιότητες όγκου (*bulk properties*), γενικά, καθορίζουν την ολική (μακροσκοπική) μηχανική συμπεριφορά του κατεργασμένου αντικείμενου ενώ οι ιδιότητες επιφάνειας (*surface properties*) καθορίζουν χαρακτηριστικά όπως η συμπεριφορά του τεμαχίου σε επαφή με άλλα σώματα ή με το περιβάλλον λειτουργίας.

Οι ιδιότητες μιας επιφάνειας εξαρτώνται από την "ποιότητα επιφάνειας" και πιο συγκεκριμένα όταν λέμε "ποιότητα επιφάνειας" αναφερόμαστε:

- Στην ακρίβεια διαστάσεων της μορφής
- Στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας (τοπογραφία)
- Στα φυσικά, μηχανικά, χημικά και κρυσταλλογραφικά χαρακτηριστικά του υλικού της επιφάνειας όπως είναι η σκληρότητα, οι παραμένουσες τάσεις, η αντίσταση σε διάβρωση ή οξείδωση, ο κρυσταλλικός ιστός (βαφή, επαναφορά, αλλαγή φάσεων, μεταβολές στο μέγεθος των κρυσταλλιτών κ.α.), ο χρωματισμός, η εμφάνιση, διάφορα ελαττώματα κ.α.

2.2 Τραχύτητα επιφάνειας

Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε περισσότερο με την "ποιότητα επιφάνειας" ύστερα από κατεργασία με αφαίρεση υλικού δηλαδή την τραχύτητα. Η μικροσκοπική παρατήρηση της τομής μιας επιφάνειας αποδεικνύει ότι στην πραγματικότητα η επιφάνεια αυτή δεν είναι απόλυτα λεία αλλά παρουσιάζει μια συνεχή εναλλαγή εξάρσεων και βυθίσεων (κορυφών και κοιλάδων), που τα χαρακτηριστικά τους προσδιορίζονται, όπως έχει αναφερθεί, από τη μέθοδο κατεργασίας της επιφάνειας και από διάφορες άλλες παραμέτρους όπως το περιβάλλον της κατεργασίας.



Εικόνα 2.2 Μορφολογίας της κατεργασμένης επιφάνειας

Η πλήρης ανάλυση των ανωμαλιών της πρέπει να γίνεται και στις τρεις διαστάσεις, αφού θεωρητικά το ύψος Z πάνω από τη λεία επιφάνεια θα δίνεται από μια συνάρτηση της μορφής :

$$z = z(x, y)$$

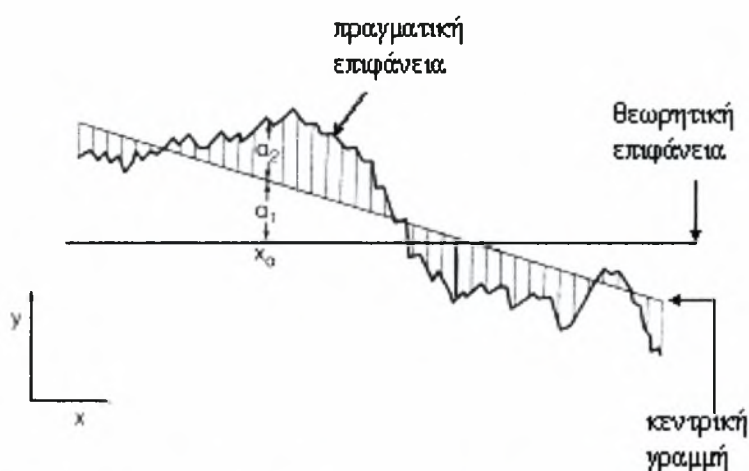
Όμως επειδή οι κυριότερες μηχανουργικές κατεργασίες λειτουργούν με αφαίρεση υλικού κατά συγκεκριμένη διεύθυνση, προκύπτει επιφάνεια με προσανατολισμένα χαρακτηριστικά, δηλαδή μέγιστες ανωμαλίες στην κάθετη προς τον άξονα κατεργασίας διεύθυνση και ελάχιστες ανωμαλίες κατά τον άξονα κατεργασίας. Σε αυτές τις περιπτώσεις αρκεί η δισδιάστατη απεικόνιση της τραχύτητας οπότε αρκεί μια συνάρτηση της μορφής:

$$z = z(y)$$

Για λόγους απλούστευσης, η ανάλυση της επιφανειακής τοπογραφίας γίνεται δισδιάστατα, ακόμα και όταν δεν συντρέχουν οι παραπάνω λόγοι, με επιλογή του άξονα Y κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δίνει τις μέγιστες ανωμαλίες.

Γενικά, η τομή μιας τεχνικής επιφάνειας από ένα κάθετο (γεωμετρικό) επίπεδο παρουσιάζει στην εικόνα 2.3. Σε τυχαία θέση x_a η απόκλιση της πραγματικής διάστασης σ_π από την θεωρητική επιφάνεια προκύπτει ως άθροισμα:

- της απόκλισης α_1 μιας γραμμής αναφοράς της πραγματικής από την θεωρητική επιφάνεια. Το α_1 ονομάζεται σφάλμα μορφής και μπορεί να προκύψει από κακή ρύθμιση ή από αδυναμία της κατεργασίας.
- της απόκλισης α_2 , η οποία οφείλεται στις ανωμαλίες της επιφάνειας.

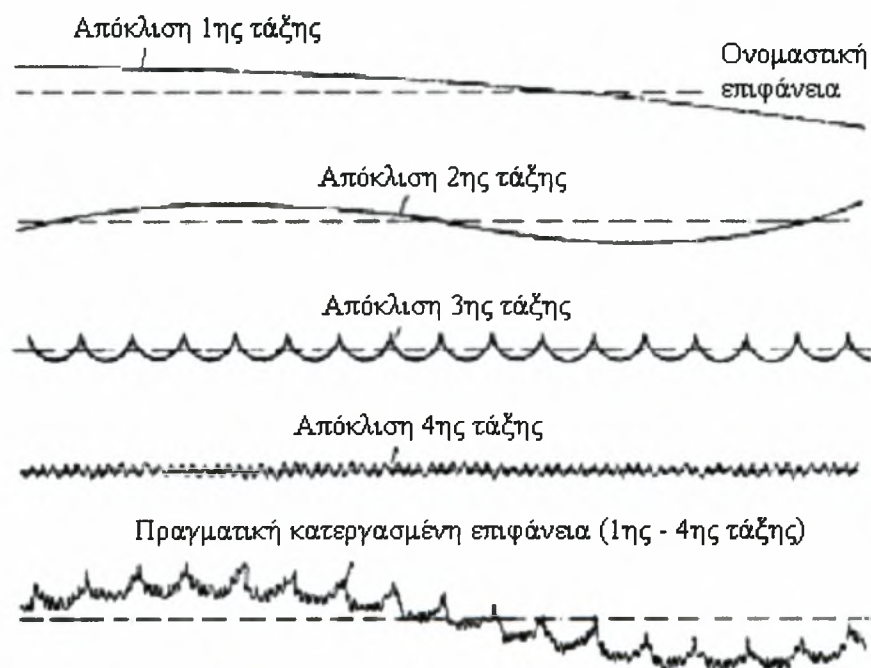


Εικόνα 2.3 Απόκλιση θεωρητικής και πραγματικής επιφάνειας

Αν κάποιος εξετάσει ενδελεχώς τις ανωμαλίες που προκαλούν τις αποκλίσεις α_2 θα διαπιστώσει ότι μπορούν να χωρισθούν στις παρακάτω κατηγορίες (εικόνα 2.4):

- *Αποκλίσεις πρώτης τάξης.* Είναι μακρογεωμετρικές αποκλίσεις από την ονομαστική επιφάνεια (για παράδειγμα αποκλίσεις από την επιπεδότητα, παραλληλότητα, καθετότητα, κυλινδρικότητα κ.τ.λ.). Τις ονομάζουμε και αποκλίσεις μορφής και οφείλονται σε σφάλματα στους ολισθητήρες της εργαλειομηχανής, σε σοβαρές παραμορφώσεις της εργαλειομηχανής, του εργαλείου ή του τεμαχίου, σε κακή στήριξη τους κ.α

- *Αποκλίσεις δεύτερης τάξης.* Αναφέρονται στην κυμάτωση της επιφάνειας με μεγάλη σχετικά περίοδο, που μπορεί να αποδοθεί σε εκκεντρότητα του κομματιού ή του εργαλείου, σε ταλαντώσεις κ.α.
- *Αποκλίσεις τρίτης τάξης.* Είναι ανωμαλίες της επιφάνειας συνήθως υπό μορφή αυλακώσεων που οφείλονται στη μορφή των εργαλείων και στην κινηματική των κατεργασιών.
- *Αποκλίσεις τέταρτης τάξης.* Είναι μικρογεωμετρικές ανωμαλίες της επιφάνειας που προκύπτουν από ατέλειες στην τρύχιση του εργαλείου, στη φθορά του, στη δημιουργία ψευδόκοψης κ.α.
- *Αποκλίσεις πέμπτης και ανώτερης τάξης.* Είναι ανωμαλίες της επιφάνειας, επίσης μικρογεωμετρικής μορφής, που αποδίδονται σε χημικές επιδράσεις και σε μεταβολές στην κρυσταλλική δομή του μετάλλου.



Εικόνα 2.4 Σύνθεση της πραγματικής επιφάνειας με υπέρθεση των αποκλίσεων όλων των τάξεων (δισδιάστατη προσέγγιση).

Οι αποκλίσεις τρίτης και ανώτερης τάξης αναφέρονται στη μικρομορφή της επιφάνειας και συνιστούν ότι ονομάζουμε "τραχύτητα επιφάνειας" (*DIN 4760*). Στον παρακάτω πίνακα μπορούμε να δούμε τα χαρακτηριστικά κάθε απόκλισης καθώς και τις πιθανές αιτίες που τις προκαλούν.

Τάξη απόκλισης	Χαρακτηριστικά αποκλίσεων	Αιτίες αποκλίσεων
1η	Μη επιπεδότητα Μη στρογγυλότητα	Σφάλματα σε ολισθητήρες εργαλειομηχανής Παραμορφώσεις εργαλειομηχανής κατεργαζομένου τεμαχίου. Εσφαλμένη στήριξη τεμαχίου.
2η	Κυματώσεις	Έκκεντρη τοποθέτηση τεμαχίου ή εργαλείου. Ταλαντώσεις εργαλείου και τεμαχίου. Σημαντική ανομοιογένεια του υλικού του τεμαχίου.
3η	Αυλακώσεις	Μορφή της κόψης του εργαλείου. Κινηματική της κατεργασίας.
4η	Ρωγμές Αποφλοιώσεις κλπ	Ατέλειες τρύχισης της κόψης του εργαλείου. Φθορά εργαλείου. Τρόπος σχηματισμού του αποβλήτου. Δημιουργία ψευδόκοψης.
5η	Φύση μετάλλου	Τρόπος κρυστάλλωσης μετάλλου. Ανωμαλίες επιφάνειας λόγω χημικών επιδράσεων. Φαινόμενα διάβρωσης.
6η	Κρυσταλλικός σχηματισμός μετάλλου	Φυσικές-χημικές μεταβολές στη δομή του υλικού. Παραμορφώσεις του κρυσταλλικού ιστού (παραμένουσες τάσεις, ολισθήσεις κρυστάλλων).

Πίνακας 2.1 Κατάταξη επιφανειακών αποκλίσεων κατεργασμένης επιφάνειας (DIN 4760).

Επιπλέον, η πραγματική τραχύτητα των ποικίλων κατεργασμένων με κοπή επιφανειών, όπως αυτές εμφανίζονται στην πράξη, αποτελεί υπέρθεση δύο ανεξάρτητων μεταξύ τους συνιστωσών τραχύτητας:

- Της θεωρητικής τραχύτητας, που εξαρτάται από την κινηματική της κατεργασίας και από τη γεωμετρική μορφή του κοπτικού μέρους του εργαλείου και
- Της φυσικής τραχύτητας, η οποία περιλαμβάνει ανωμαλίες της κατεργασμένης επιφάνειας, δημιουργούμενες κατά τη διάρκεια της κοπής και οφειλόμενες κυρίως στην ψευδόκοψη, στο μηχανισμό σχηματισμού του

αποβλήτου, στη φθορά του εργαλείου, σε τυχόν ταλαντώσεις, σε επιδράσεις της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας, στα χρησιμοποιούμενα υγρά κοπής κ.α.

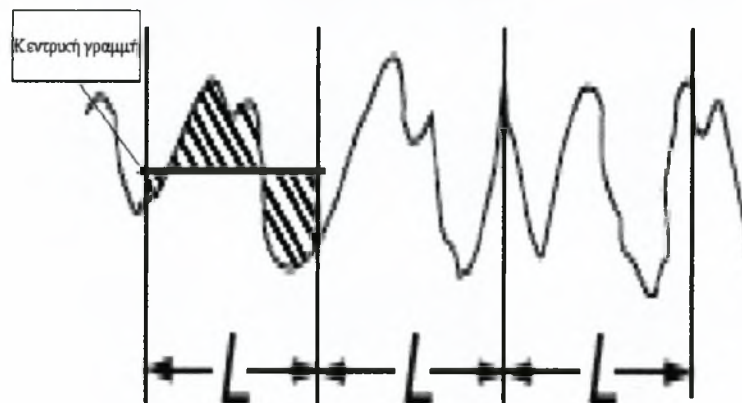
Για τη μέτρηση της τραχύτητας χρησιμοποιούνται σήμερα δύο συστήματα:

- α) Το σύστημα E ή σύστημα περιβάλλουσας (*envelope*) κυρίως στη Δυτική Ευρώπη.
- β) Το σύστημα M ή σύστημα μέσης γραμμής (Mean Line) κυρίως στις Αγγλοσαξονικές χώρες και την Ανατολική Ευρώπη. Το σύστημα αυτό κερδίζει σταθερά έδαφος έναντι του E.

2.3 Περιγραφή συστήματος M

Για μπορέσουμε να μετρήσουμε την τραχύτητα μίας επιφάνειας με το σύστημα Μέσης Γραμμής (Mean Line System) ή πιο απλά το σύστημα M χρησιμοποιούμε ένα προφυλόμετρο στυλίσκου. Το όργανο αυτό χρησιμοποιεί έναν ειδικό δρομέα (στυλίσκος) με τον οποίο όχι μόνο μετράει το μέγεθος των ανωμαλιών αλλά ανιχνεύει και το σχήμα τους.

Για την μέτρηση των παραπάνω μεγεθών το σύστημα M κατ' αρχήν ορίζει ένα καθορισμένο μήκος καθορισμένο L το οποίο καλούμαι δειγματοληπτικό μήκος. Στην συνέχεια το σύστημα χαράσσει τη κεντρική γραμμή αναφοράς. Η γραμμή αυτή είναι παράλληλη προς τη γενική κατεύθυνση του πραγματικού περιγράμματος της επιφάνειας (πραγματική κατατομή) ως προς την οποία αναφέρονται οι κάθετες τοπικές αποκλίσεις y_i και έχει την ιδιότητα να διαιρεί το χώρο έτσι ώστε το εμβαδόν των περιοχών ανάμεσα σε αυτή και τις κορυφές να ισούται με το εμβαδόν των περιοχών ανάμεσα σε αυτή και τις κοιλάδες, όπως στην *Εικόνα 2.5*.



Εικόνα 2.5 Ορισμός κεντρικής γραμμής και δειγματοληπτικού μήκους L

Τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του συστήματος M συνοψίζονται στα εξής:

1. Είναι απλό από μετροτεχνική άποψη και ιδανικό για ηλεκτρική μέτρηση.
2. Ο ορισμός της κεντρικής γραμμής έχει χαρακτηριστεί σαν αυθαίρετος, ανακριβής και αντιεπιστημονικός. Ωστόσο, τελευταίες έρευνες έχουν δείξει ότι τα σφάλματα που προκύπτουν από αυτή την προσέγγιση είναι πρακτικά αμελητέα.
3. Έχει υποστηριχθεί ότι η περιβάλλουσα επαφής του συστήματος E προσδιορίζεται ευκολότερα από τη μέση γραμμή του M . Όμως για να χαραχθεί η περιβάλλουσα πρέπει η πραγματική κατατομή να είναι ακριβώς γνωστή, πράγμα που δεν συμβαίνει στην πράξη, παρά μόνο όταν γίνεται πλήρης καταγραφή της κατατομής και όχι απλά μέτρηση της τραχύτητας.
4. Στην πραγματικότητα τα σημερινά τραχύμετρα του συστήματος M χρησιμοποιούν σφαιρικό πέδιλο το οποίο ακολουθεί τη στάθμη αναφοράς. Λειτουργούν κατά συνέπεια με γεωμετρία του συστήματος E αποτελώντας έτσι ένα συμβιβασμό μεταξύ των δύο συστημάτων.

2.4 Παράμετροι μέτρησης της Τραχύτητας

Όπως έχει προαναφερθεί σε κάθε τεχνολογική εφαρμογή η ποιότητας της επιφανείας είναι κριτικής σημασίας, συνεπώς πρέπει να γνωρίζουμε την τραχύτητα της. Όμως η στοχαστική φύση της τραχύτητας, συνέπεια της μεταβλητότητας της κατεργασίας και του μετροτεχνικού σφάλματος, δεν μας έχει επιτρέψει μέχρι στιγμής την καθιέρωση μιας ικανοποιητικής και γενικά παραδεκτής παραμέτρου χαρακτηρισμού της επιφάνειας.

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφοροι παράμετροι, που ανήκουν και στα δύο παραπάνω συστήματα (M και E), με ποικίλα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι παράμετροι αυτοί, που ταυτόχρονα είναι και παράμετροι μέτρησης της τραχύτητας, μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις ομάδες με κριτήριο τα χαρακτηριστικά του περιγράμματος που ποσοτικοποιούν.

- Παράμετροι εύρους
- Παράμετροι διαστήματος
- Στατιστικές παράμετροι
- Άλλες παράμετροι

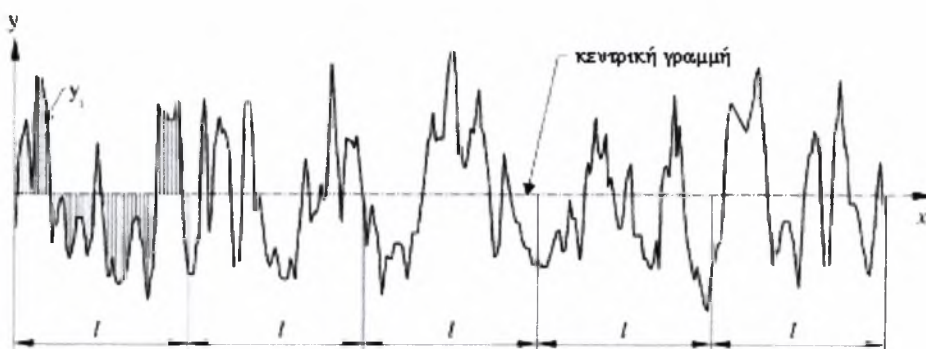
Παρακάτω θα αναφερθούμε συνοπτικά σε μερικές από τις πιο βασικές παραμέτρους χαρακτηρισμού επιφάνειας.

2.4.1 Μέση αριθμητική τραχύτητα R_a

Είναι η παράμετρος που θα χρησιμοποιήσουμε στην συγκεκριμένη διατριβή για τον χαρακτηρισμό της επιφανειακής τοπογραφίας των δοκιμίων, αποτελεί μια παράμετρο εύρους, που είναι από τις πλέον διαδεδομένες και χρήσιμες διεθνώς.

Παριστάνει τη μέση τιμή των αποκλίσεων $|y|$ όλων των σημείων της πραγματικής κατατομής από την κεντρική γραμμή μέσα στο δεδομένο δειγματοληπτικό μήκος l (σχήμα 3.4). Και ορίζεται:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$



Εικόνα 2.6 Ορισμός μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a

Η μέση αριθμητική τραχύτητα R_a , παράμετρος ποσοτικού χαρακτηρισμού της τραχύτητας δεδομένης επιφάνειας, ορίζεται και υπολογίζεται εύκολα με άμεση ολοκλήρωση από τα τραχύμετρα. Η γνώση της παρέχει μια χρήσιμη μέση τιμή, τόσο για τον έλεγχο της κατεργασίας παραγωγής της επιφάνειας, όσο και για τη λειτουργική της συμπεριφορά. Μειονέκτημα της αποτελεί το γεγονός ότι, δεν δίνει πληροφορίες για το πραγματικό ύψος των ανωμαλιών και δεν έχει ιδιαίτερη φυσική έννοια.

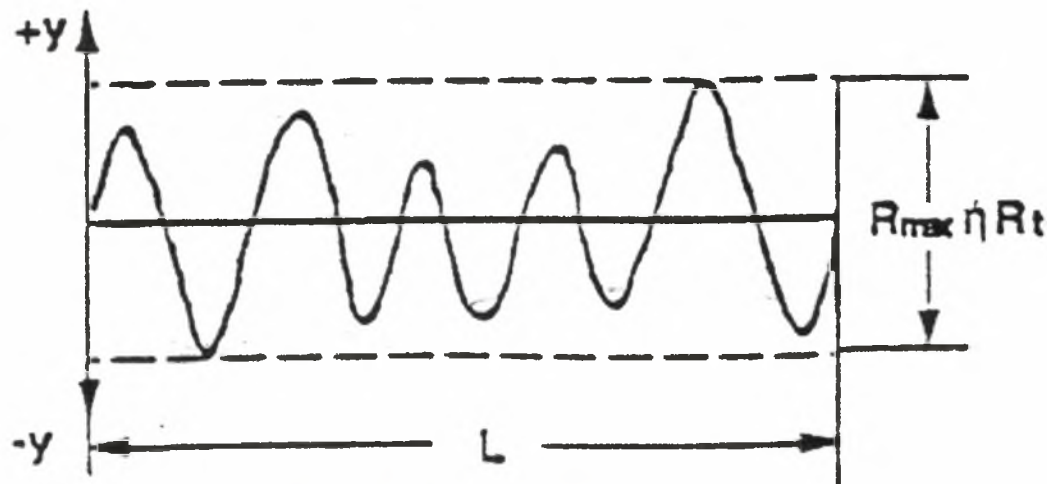
2.4.2 Μέση τετραγωνική τιμή της τραχύτητας R_q

Η παράμετρος αυτή ανήκει στην κατηγορία των παραμέτρων εύρους, πρόκειται ουσιαστικά για την τυπική απόκλιση των αποστάσεων των κορυφών και των εσοχών από τη μέση γραμμή. Είναι περισσότερο ευαίσθητη από την R_a σε περιπτώσεις μεγάλων αποκλίσεων από την κεντρική γραμμή, κάτι που αποτελεί μάλλον μειονέκτημα για το γενικό χαρακτηρισμό της επιφάνειας. Ωστόσο έχει το πλεονέκτημα ότι η μέτρηση μέσω ηλεκτρικού σήματος είναι απλούστατη αφού μετράται η τιμή του σήματος που παράγεται από το τραχύμετρο και δεν απαιτείται καμία περαιτέρω επεξεργασία. Η τιμή της προκύπτει συνήθως περίπου κατά 10% μεγαλύτερη από το μέσο ύψος R_a . Και ο μαθηματικός ορισμός της είναι:

$$R_q = \frac{1}{l} \int_0^l y^2 dx$$

2.4.3 Μέγιστο Βάθος R_t και Μέγιστη διαφορά κορυφής από κοιλάδα (R_y).

Άλλες δύο παράμετροι εύρους, η R_t παριστάνει την υψομετρική διαφορά της υψηλότερης κορυφής των επιφανειακών ανωμαλιών από την βαθύτερη κοιλάδα μέσα σε ένα δειγματοληπτικό μήκος. Το R_y ορίζεται ως το μέγιστο των παραμέτρων R_{ti} μέσα στο συγκεκριμένο και καθορισμένο μήκος μέτρησης του προφίλ.



Εικόνα 2.7 Ορισμός μέγιστο Βάθος R_t

2.4.4 Μέτρηση ύψους 5 σημείων R_z

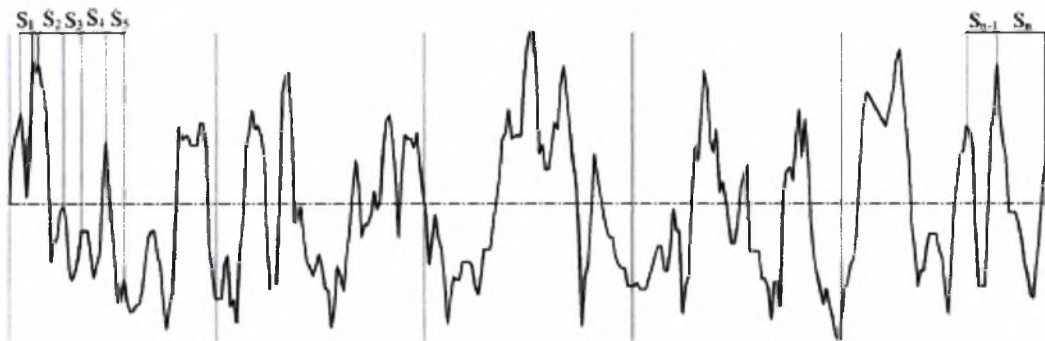
Και αυτή είναι μια παράμετρος εύρους, ορίζεται σαν τη μέση διαφορά του μέσου όρου των πέντε ψηλότερων κορυφών και των πέντε χαμηλότερων κοιλάδων μέσα σε ένα συγκεκριμένο δειγματοληπτικό μήκος. Η παράμετρος R_z παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία σε τυχαίες τοπικές ανωμαλίες από την παράμετρο της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a . Ο μαθηματικός ορισμός της είναι:

$$R_{z(ISO)} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^n v_i \right)$$

2.4.5 Μέσο διάστημα διαδοχικών τοπικών κορυφών (R_s ή S_m).

Η παράμετρος αυτή ανήκει στην κατηγορία των παραμέτρων διαστήματος, ορίζεται ως η μέση οριζόντια απόσταση των διαδοχικών κορυφών του προφίλ, σε ένα συγκεκριμένο και προκαθορισμένο μήκος (Εικόνα 2.7). Ως τοπική κορυφή ορίζεται η οριζόντια απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές κορυφές και υπολογίζεται μόνο αν η κατακόρυφη απόσταση των δύο διαδοχικών κορυφών είναι μεγαλύτερη του 10% του μέγιστου ύψους προφίλ (R_t). Ο μαθηματικός ορισμός του είναι

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n S_i$$



Εικόνα 2.8 Ορισμός μέσου διαστήματος διαδοχικών τοπικών κορυφών s_m

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

3.1 Γενικά

Η θεμελίωση μαθηματικών σχέσεων είναι συστατικό στοιχείο της επιστήμης και προάγει τη γνώση του αντικείμενου μελέτης. Όταν προσδιορίσουμε την σχέση που συνδέει ένα χαρακτηριστικό με ένα άλλο ή περισσότερα από ένα τότε μπορούμε να προβλέψουμε τις συνέπειες των χειρισμών μας και άρα να επέμβουμε έτσι ώστε να επηρεάσουμε, με τρόπο επιθυμητό το προς εξέταση περιβάλλον. Η σχέση που συνδέει αυτά τα χαρακτηριστικά λέγεται μοντέλο ή υπόδειγμα.

Στα πλαίσια μιας επιστημονικής ανάλυσης το μοντέλο έχει τη μορφή ενός ή περισσότερων μαθηματικών τύπων που έχουν σκοπό να περιγράψουν την σχέση που συνδέει δύο ή περισσότερες μεταβλητές. Όταν μας ενδιαφέρει να προσδιορίσουμε ένα μοντέλο για να ερμηνεύσουμε την συμπεριφορά της μεταβλητής Y με βάση την συμπεριφορά των μεταβλητών X_1, X_2, \dots, X_k , τότε ονομάζουμε την Y εξαρτημένη μεταβλητή και της X_1, X_2, \dots, X_k ανεξάρτητες ή ερμηνευτικές μεταβλητές.

Ανάλογα με το αν η ανάλυση μας είναι θεωρητική ή πειραματική, διακρίνουμε δύο μεγάλες κατηγορίες μοντέλων: τα προσδιοριστικά ή μαθηματικά και τα στοχαστικά ή στατιστικά. Το δικό μας μοντέλο είναι προφανώς στοχαστικό.

Στα στοχαστικά μοντέλα λαμβάνεται υπ' όψη ότι οι εξαρτημένες μεταβλητές είναι τυχαίες, έτσι εισάγουμε τον τυχαίο όρο ε (όρο σφάλματος). Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο δεν μπορεί να περιγράψει επ' ακριβώς την σχέση μεταξύ της ανεξάρτητης και των εξαρτημένων μεταβλητές. Εξ αιτίας αυτής της τυχειότητας και του σφάλματος το οποίο είναι επακόλουθο της, εισάγεται ο όρος εκτίμηση του στατιστικού μοντέλου. Η σημασία του όρου «εκτίμηση» είναι διττή:

1. Ότι, όπως αναφέρθηκε, η σχέση που συνδέει την εξαρτημένη μεταβλητή και τις ανεξάρτητες είναι προσεγγιστική

2. Ότι, ο προσδιορισμός της σχέσης γίνεται με την στατιστική επεξεργασία μόνον ενός δείγματος παρατηρήσεων. Επομένως στην πράξη σε καμιά περίπτωση δεν θα έχουμε ακριβές μοντέλο αλλά την εκτίμηση του.

Η εξαγωγή συμπερασμάτων για ολόκληρο τον πληθυσμό συνεπάγεται αβεβαιότητα και γίνεται με την μεθοδολογία της Στατιστικής Συμπερασματολογίας (*Statistical Inference*).

3.2 Παραγοντικός σχεδιασμός (factorial design)

Η ανάλυση των δεδομένων στην παρούσα διπλωματική θα διεξαχθεί με βάση τον πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό (*full factorial design*), ο οποίος εμφανίζει πολύ μεγάλη χρησιμότητα στην ανάλυση πειραμάτων, στα οποία εμπλέκονται διαφορετικοί παράγοντες και οι αλληλεπιδράσεις τους.

Τα παραγοντικά πειράματα αναλύουν την επίδραση δύο ή περισσότερων παραγόντων στην εξαρτημένη μεταβλητή Y για την οποία εκτιμούν και ένα στοχαστικό μοντέλο. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν έναντι άλλων στατιστικών μεθόδων (π.χ.. Λατινικά και Ελληνολατινικά Τετράγωνα), είναι ότι δεν χρειάζεται οι παράγοντες να κινούνται σε ίδιο αριθμό επιπέδων και επίσης, δεν επηρεάζονται από τυχόν αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων, η οποία και λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση. Ο όρος αλληλεπίδραση (*interaction*), αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο οι ανεξάρτητες μεταβλητές συνδυάζονται για να επηρεάσουν μια εξαρτημένη μεταβλητή και όχι στην σχέση μεταξύ των ανεξαρτήτων μεταβλητών αυτών καθ'αυτών. Δύο ανεξάρτητες μεταβλητές είναι δυνατόν να αλληλεπιδρούν, ανεξάρτητα από το κατά πόσον είναι μεταξύ τους στατιστικά συσχετισμένες.

3.3 Ανάλυση παλινδρόμησης

Η εκτίμηση ενός στατιστικού μοντέλου γίνεται με ανάλυση στατιστικών δεδομένων, δηλαδή παρατηρήσεων της εξαρτημένης μεταβλητής Y σε επιλεγμένα επίπεδα των ερμηνευτικών μεταβλητών. Όλες οι στατιστικές τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για τον σκοπό αυτό αναφέρονται ως Ανάλυση Παλινδρόμησης (*Regression Analysis*).

Αντίστοιχα, το στατιστικό μοντέλο ονομάζεται και Μοντέλο Παλινδρόμησης (*Regression Model*).

Ειδικότερα, το μοντέλο στο οποίο καταλήγουμε με την στατιστική ανάλυση ενός δείγματος παρατηρήσεων της Y ονομάζεται εκτιμηθέν ή εμπειρικό μοντέλο (*estimated or empirical model*), ενώ αυτό το οποίο αναφέρεται σε όλες τις δυνατές τιμές της Y ονομάζεται Θεωρητικό ή μοντέλο Παλινδρόμησης για τον πληθυσμό.

Η γενική μορφή ενός θεωρητικόν μοντέλον Παλινδρόμησης για την τυχαία μεταβλητή Y με ερμηνευτικές μεταβλητές τις X_1, \dots, X_k είναι η εξής:

$$Y = f(X_1, \dots, X_k) + \varepsilon$$

$$\text{με } E(\varepsilon) = 0 \Rightarrow E(Y) = f(X_1, \dots, X_k)$$

Δηλαδή η τυχαία μεταβλητή εκφράζεται ως άθροισμα δυο μερών: μιας μέσης σχέσης, δηλαδή μιας σχέσης που εκφράζει τη μέση τιμή της εξαρτημένης ως συνάρτηση των ερμηνευτικών μεταβλητών X_1, \dots, X_k και ενός τυχαίου όρου. Η $f(X_1, \dots, X_k)$ ονομάζεται συνάρτηση παλινδρόμησης της Y επί των X_1, \dots, X_k (*regression function of Y on X_1, \dots, X_k*). Η απλούστερη και η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μορφή αυτής της συνάρτησης είναι η γραμμική, οπότε προκύπτει αντίστοιχα το γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης. Όταν $k=1$ το μοντέλο ονομάζεται απλό (*simple*), ενώ όταν $k>1$ ονομάζεται πολλαπλό (*multiple*) ή πολυμεταβλητό (*multivariable*) μοντέλο.

3.4 Γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης

Το απλό γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης για την τυχαία μεταβλητή Y με ερμηνευτική μεταβλητή την X γράφεται ως εξής:

$$Y = b_0 + b_1 X + \varepsilon$$

$$\text{με } E(\varepsilon) = 0$$

Η συνάρτηση παλινδρόμησης της Y επί της X είναι η

$$E(Y) = b_0 + b_1 X$$

Δηλαδή η μέση τιμή της Y για ορισμένη τιμή της X θα βρίσκεται επάνω σε μια ευθεία με σταθερό όρο b_0 και κλίση b_1 .

Το πολυμεταβλητό γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης γράφεται ως εξής:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_k X_k + \varepsilon$$

$$\text{με} \quad E(Y) = b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_k X_k$$

Το b_0 είναι ο σταθερός όρος της συνάρτησης παλινδρόμησης δηλαδή η τιμή της Y όταν $X_1 = \dots = X_k = 0$. Ο συντελεστής b_j , $j=1, \dots, k$ ονομάζεται μερικός ή καθαρός συντελεστής παλινδρόμησης (*partial or net regression coefficient*) της X_j και ερμηνεύεται ως εξής: όταν η ερμηνευτική μεταβολή X_j αυξηθεί κατά μία μονάδα και οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμείνουν σταθερές, τότε η μέση τιμή της Y μεταβάλλεται κατά b_j .

Το γραμμικό μοντέλο μπορεί εκ πρώτης όψεως να θεωρηθεί περιοριστικό. Έτσι, όταν για την τυχαία μεταβλητή Y θεωρήσουμε το απλό γραμμικό μοντέλο για k ερμηνευτικές μεταβλητές, δηλαδή το

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_k X_k + \varepsilon$$

$$\text{με} \quad E(Y) = b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_k X_k$$

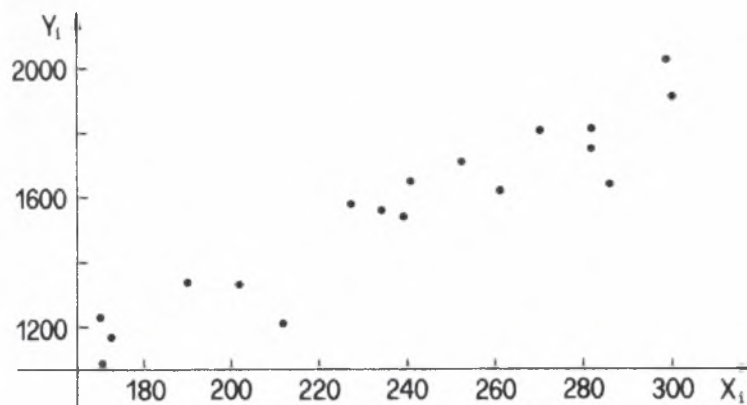
κάνουμε την υπόθεση ότι κάθε φορά που η ερμηνευτική μεταβλητή X_j αυξηθεί κατά μία μονάδα και οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμείνουν σταθερές τότε η μέση τιμή της Y μεταβάλλεται κατά b_j ανεξάρτητα από το σημείο που γίνεται η αύξηση, γεγονός που στις περισσότερες περιπτώσεις δεν ισχύει.

Όμως όταν οι ερμηνεύτηκες μεταβλητές δεν εξαρτώνται από κάποια άγνωστη παράμετρο και καμία άγνωστη παράμετρος δεν είναι συνάρτηση κάποιας άλλης, μπορούμε με τον κατάλληλο μετασχηματισμό να μετατρέψουμε οποιαδήποτε μη γραμμική συνάρτηση παλινδρόμησης σε γραμμική.

3.5 Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το γραμμικό μοντέλο παρά την απλότητα του είναι αρκετά γενικό. Για αυτό εμείς θα χρησιμοποιήσουμε το απλό γραμμικό μοντέλο ως πρότυπο προκειμένου να δοθούν οι απαραίτητοι ορισμοί που θα μας διευκολύνουν στην καλύτερη κατανόηση της μεθόδου.

Αρχικά θα ορίσουμε το διάγραμμα διασποράς το οποίο συνιστά την γραφική παράσταση των σημείων (X_i, Y_i) στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Παρακάτω μπορούμε να δούμε ένα ενδεικτικό διάγραμμα διασποράς δεδομένων.



Εικόνα 3.1 Διάγραμμα διασποράς

Παρατηρούμε ότι τα σημεία τείνουν να συγκεντρωθούν γύρω από μια ευθεία γραμμή. Μπορούμε επομένως να χρησιμοποιήσουμε μια εξίσωση ευθείας για να περιγράψουμε περιληπτικά την παρατηρούμενη σχέση. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται προσαρμογή μιας ευθείας στα δεδομένα (*fitting a line to data*).

Μέσα στα πλαίσια αυτά θα πρέπει κατ' αρχήν να επιλέξουμε το κριτήριο με βάση το οποίο θα κριθεί αν η προσαρμοζόμενη ευθεία είναι η βέλτιστη δυνατή. Η μέθοδος που έχουμε επιλέξει και την οποία χρησιμοποιεί και το πρόγραμμα μας είναι η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων. Η μέθοδος αυτή ορίζει ως κριτήριο καλής προσαρμογής την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγωνικών σφαλμάτων και είναι μια γενική μέθοδος εκτίμησης. Όταν εφαρμόζεται για την προσαρμογή μιας ευθείας σε n ζεύγη (X_j, Y_j) ορίζει την Ευθεία Ελαχίστων Τετραγώνων. Η λογική της μεθόδου θα γίνει κατανοητή με την αναλυτική παρουσίαση της Ευθείας Ελαχίστων Τετραγώνων.

3.5.1 Η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων

Ας θεωρήσουμε την εικόνα 3.2 στην οποία δίνεται η ευθεία L με εξίσωση και ένα σημείο (X_j, Y_j) . Το σημείο αυτό απέχει από την L κατά:

$$\varepsilon_i = Y_j - (b_0 + b_1 X_j)$$

Είναι προφανές ότι αν θεωρήσουμε μια άλλη ευθεία έστω την L' με εξίσωση $Y' = b_0' + b_1 X'$, τότε το σημείο αυτό θα απέχει από την L' κατά:

$$\varepsilon_i' = Y_i - (b_0' + b_1' X_i)$$

Μέσα στα πλαίσια αυτά από όλες τις δυνατές ευθείες στο επίπεδο XY , κάθε μια από τις οποίες προσδιορίζεται πλήρως από το ζεύγος των παραμέτρων (b_0, b_1) , η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων (*least squares line*) είναι εκείνη που ελαχιστοποιεί το άθροισμα των τετραγώνων $\sum \varepsilon_i^2$ των n αποστάσεων $\varepsilon_i = Y_i - (b_0 + b_1 X_i)$. Επομένως, αναζητώντας την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων στην πραγματικότητα αναζητούμε τις τιμές \hat{b}_0 και \hat{b}_1 των b_0 και b_1 αντίστοιχα που ελαχιστοποιούν την συνάρτηση

$$S = S(b_0, b_1) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - b_0 + b_1 X_i)^2.$$

Επειδή η εξίσωση της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων :

$$\hat{Y} = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 X$$

χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της $Y = b_0 + b_1 X$ θα αναφέρεται ως εκτημηθείσα σχέση (*estimated relation*) ή εκτημηθέν μοντέλο (*estimated model*)

3.5.2 Τα σφάλματα εκτίμησης ή κατάλοιπα

Η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων σκοπό έχει να συλλάβει την προσεγγιστική σχέση που συνδέει τις τιμές X_i και Y_i των δεδομένων μας. Αν στην εξίσωση της ευθείας αυτής αντικαταστήσουμε όπου X τις τιμές X_i των δεδομένων μας παίρνουμε τις εκτιμήσεις.

$$\hat{Y}_i = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 X_i \quad i=1, \dots, n$$

οι όποιες φυσικά βρίσκονται επάνω στην ίδια ευθεία

Οι διαφορές των εκτιμήσεων \hat{Y}_i από τις παρατηρήσεις Y_i συμβολίζονται με $\hat{\varepsilon}_i$ ονομάζονται σφάλματα εκτίμησης (*Errors of Estimation*) ή κατάλοιπα ή υπόλοιπα (*Residuals*). Δηλαδή έχουμε:

$$\hat{\varepsilon}_i = Y_i - \hat{Y}_i = Y_i - \hat{b}_0 - \hat{b}_1 X_i, \quad i=1, \dots, n$$

Το σφάλμα $\hat{\varepsilon}_i$ είναι το μέρος της παρατήρησης Y_i που δεν συμπεριλαμβάνεται στην ευθεία ελαχίστων τετραγώνων. Επομένως αν η εκτιμηθείσα ευθεία αποκλίνει πολύ από τη συστηματική συμπεριφορά των σημείων (X_i, Y_i), θα υπάρχει στα κατάλοιπα κάποια συστηματικότητα. Πράγματι, ο έλεγχος των καταλοίπων είναι το κλειδί για την αξιολόγηση του εκτιμηθέντος μοντέλου. Ειδικότερα, θεωρείται ικανοποιητικό εκείνο το μοντέλο το οποίο αφήνει κατάλοιπα εντελώς τυχαία διατεταγμένα.

Το άθροισμα των τετράγωνων των σφαλμάτων (*Sum of Squared Errors*) έχει καθιερωθεί να συμβολίζεται διεθνώς με SSE από τα αρχικά των αντίστοιχων αγγλικών όρων και ορίζεται ως :

$$SSE = \sum \hat{\varepsilon}_i^2 = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

Ενώ το άθροισμα των τετράγωνων παλινδρόμησης (*Regression Sum of Squared Errors*) συμβολίζεται διεθνώς με SSR και ορίζεται ως :

$$SSR = \sum (Y_i - \bar{Y})^2$$

3.5.3 Ανάλυση διακύμανσης

Γνωρίζουμε ότι η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων αφήνει το μικρότερο άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων SSE. Όμως, αν η τιμή του SSE δηλώνει καλή προσαρμογή της ευθείας στα δεδομένα ή όχι εξαρτάται από την διακύμανση των παρατηρήσεων Y_i . Η διακύμανση των n παρατηρήσεων Y_i μετριέται με τον όρο $\sum (Y_i - \bar{Y})^2$, διαιρεμένο δια των αντίστοιχων $n-1$ βαθμών ελευθερίας, τους οποίους στην παρούσα ανάλυση μπορούμε να αγνοήσουμε.

Ο όρος $\sum (Y_i - \bar{Y})^2$ ονομάζεται ολικό άθροισμα τετραγώνων (*Sum of Squares Total*) και έχει καθιερωθεί να συμβολίζεται διεθνώς με SST από τα αρχικά των αντίστοιχων αγγλικών όρων. Δηλαδή έχουμε :

$$SST = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$$

Το SST μπορεί να ερμηνευτεί ως ένα συνολικό μέτρο σφάλματος, αν εκτιμήσουμε τις Y_i χωρίς να πάρουμε υπόψη την X . Πράγματι, όταν αγνοήσουμε την X η καλύτερη εκτίμηση για τις Y_i είναι ο αριθμητικός τους μέσος \bar{Y} και τα σφάλματα αυτής της εκτίμησης είναι τα $Y_i - \bar{Y}$, $i = 1, \dots, n$.

Αν πάρουμε υπόψη την σχέση που συνδέει την Y με την X , την οποία προσεγγίσαμε με την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων, τότε θα εκτιμήσουμε τις παρατηρήσεις Y_i με τις $\hat{Y}_i = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 X_i$ και τα σφάλματα εκτίμησης τώρα είναι τα $Y_i - \hat{Y}_i$. Το άθροισμα των τετραγώνων αυτών των σφαλμάτων έχει καθιερωθεί να συμβολίζεται διεθνώς με SSE (*Sum of Squares Error*) από τα αρχικά των αντίστοιχων αγγλικών όρων. Δηλαδή έχουμε:

$$SSE = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

Είναι προφανές ότι η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων βελτιώνει την εκτίμηση των Y_i σε σχέση με τον \bar{Y} αν το SSE είναι μικρότερο σε σχέση με το SST.

3.6 Η διαδικασία εκτίμησης ενός μοντέλου Παλινδρόμησης

Σε ένα πρακτικό πρόβλημα παλινδρόμησης έχουμε στην διάθεση μας ένα σύνολο δεδομένων και επιζητούμε ένα μοντέλο για την Y , δηλαδή έναν μαθηματικό τύπο, ο οποίος περιγράφει τον μηχανισμό παραγωγής των τιμών της Y . Τονίζεται για μια ακόμη φορά ότι λόγω της τυχαιότητας της Y θα υπάρχει πάντα ένα μέρος, το οποίο δεν μπορεί συμπεριληφθεί στον μαθηματικό τύπο. Το μέρος αυτό ονομάζεται κατάλοιπο ή υπόλοιπο (*residual*) ή σφάλμα εκτίμησης (*error of estimation*) και επιθυμούμε να είναι ελάχιστο.

Η διαδικασία εκτίμησης του μοντέλου περιλαμβάνει περισσότερα από ένα στάδια, ως εξής:

Αρχικά γίνεται η επιλογή των ερμηνευτικών μεταβλητών με βάση την σχετική θεωρία ή τη γνώση μας για τη διαδικασία παραγωγής των τιμών της Y . Στη συνέχεια της ανάλυσης κάποιες απ' αυτές μπορούν να κριθούν περιττές ή να προστεθούν δυνάμεις ή γινόμενα ως επί πλέον ερμηνευτικές μεταβλητές.

Στο δεύτερο στάδιο γίνεται η εξειδίκευση του μοντέλου (*model specification*) που περιλαμβάνει:

- (i) την επιλογή ενός μαθηματικού τύπου για το προσδιοριστικό μέρος της σχέσης της Y με την ή τις ερμηνευτικές μεταβλητές, και
- (ii) την περιγραφή της στοχαστικής συμπεριφοράς του τυχαίου μέρους.

Η εξειδίκευση αποτελεί ίσως το δυσκολότερο στάδιο στη διαδικασία εκτίμησης του μοντέλου. Όταν έχουμε μία μόνον υποψήφια ερμηνευτική μεταβλητή, τότε το διάγραμμα διασποράς δηλαδή το γράφημα των η ζεύγων (X_i, Y_i) στο σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων μπορεί στις περισσότερες περιπτώσεις, να δώσει σαφείς ενδείξεις για την καταλληλότερη εξειδίκευση. Όταν οι υποψήφιες ερμηνευτικές μεταβλητές είναι περισσότερες από μία, τότε δεν είναι πάντα ευκολο να ανιχνεύσουμε την κατάλληλη εξειδίκευση. Όπως ειδικότερα αναλύεται στο αμέσως επόμενο τμήμα, αρχίζουμε την ανάλυση υιοθετώντας ότι η συνάρτηση παλινδρόμησης είναι γραμμική, εκτός αν υπάρχει μια καλά δομημένη αντίθετη θεωρία. Συγχρόνως, υποθέτουμε ότι το τυχαίο μέρος ικανοποιεί τις συνθήκες εκείνες που κάνουν τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων άριστη. Οι υποθέσεις αυτές θα ελεγχθούν και ίσως να απορριφθούν στο τελικό στάδιο της διαδικασίας αυτής, οπότε θα γίνει νέα εξειδίκευση.

Το τρίτο στάδιο στη διαδικασία εκτίμησης του μοντέλου είναι η προσαρμογή (*fitting*) του στα δεδομένα. Με τον όρο αυτό εννοούμε την επιλογή τιμών για τις παραμέτρους του μοντέλου, έτσι ώστε αυτό να εκτιμά τις παρατηρήσεις Y_1, \dots, Y_n «καλύτερα» σύμφωνα με κάποιο κριτήριο. Όταν το μοντέλο είναι γραμμικό και η πιθανοκρατική συμπεριφορά του τυχαίου μέρους ικανοποιεί ορισμένες συνθήκες, τότε επιλέγεται ως κριτήριο καλής προσαρμογής η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος για όλες τις τιμές Y_i των τετραγωνικών σφαλμάτων εκτίμησης. Ισοδύναμα, επιλέγεται ως μέθοδος εκτίμησης η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων, η οποία στην περίπτωση αυτή είναι άριστη.

Στο τέταρτο στάδιο τα αποτελέσματα του προηγούμενου σταδίου γενικεύονται σε όλες τις παρατηρήσεις Y_i της Y , οι οποίες θα μπορούσαν να είχαν συλλεγεί με τον ίδιο τρόπο που έχουν συλλεγεί οι παρατηρήσεις των δεδομένων μας. Συγχρόνως μετριέται η αξιοπιστία αυτής της γενίκευσης. Να σημειωθεί ότι η θεωρία και πρακτική αυτής της γενίκευσης είναι πλήρης μόνον στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Στις άλλες μεθόδους εκτίμησης, είτε είναι υπό ανάπτυξη (όπως π.χ. στη Μ-εκτίμηση), είτε δεν είναι δυνατόν να αναπτυχθεί (όπως π.χ. στην εκτίμηση με την μέθοδο της ελάχιστης διαμέσου των τετραγωνικών σφαλμάτων).

Το τελευταίο στάδιο είναι γνωστό ως διαγνωστικός έλεγχος (*diagnostic checking*) του μοντέλου, και περιλαμβάνει όλες τις τεχνικές με τις οποίες ελέγχεται η καταλληλότητα του εκτιμηθέντος μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται αν οι υποθέσεις που έγιναν για την συνάρτηση παλινδρόμησης και για τον όρο σφάλματος στηρίζονται από τα δεδομένα ή αν θα πρέπει να γίνουν τροποποιήσεις στην εξειδίκευση του μοντέλου, τροποποιήσεις που πιθανόν να υπαγορεύουν άλλη μέθοδο εκτίμησης εκτός από τα ελάχιστα τετράγωνα. Ακόμη, ερευνάται αν τα σημεία των δεδομένων είναι όλα εξίσου αξιόπιστα ή αν κάποιο ή κάποια απ' αυτά συμπεριφέρονται διαφορετικά. Στην περίπτωση αυτή τα λεγόμενα «ασυνήθιστα» σημεία (*outliers*) θα πρέπει να αφαιρεθούν ή να εξομαλυνθούν και η διαδικασία εκτίμησης να επαναληφθεί.

Η παραπάνω διαδικασία είναι αρκετά επίπονη, ιδιαίτερα όταν ο αριθμός παρατηρήσεων είναι μεγάλος ή όταν έχουμε περισσότερες από 3 ερμηνευτικές μεταβλητές. Για αυτό το λόγο έχουν δημιουργηθεί στατιστικά προγράμματα όπως αυτό που θα χρησιμοποιήσουμε εμείς (*Minitab 14*).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

4.1 Γενικά

Όπως έχει προαναφερθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετήσουμε την κοπή με νερό υψηλής πίεσης. Για να καταστεί αυτό δυνατό θα εξετάσουμε δύο από τα πιο σημαντικά ποιοτικά χαρακτηριστικά της υδροκοπής, την γεωμετρία του αρμού κοπής και την τραχύτητα.

Η γεωμετρία του αρμού κοπής είναι ιδιάζουσας σημασίας, τόσο γιατί είναι καθοριστικός παράγοντας για την διαστατική ακρίβεια και την συναρμογή του κατεργαζόμενου τεμαχίου, όσο και γιατί από αυτή εξαρτάται ο όγκος του υλικού που αφαιρείται κατά την κοπή. Για τον προσδιορισμό της χρησιμοποιήσαμε ένα στερεοσκοπικό μικροσκόπιο. Με αυτό φωτογραφίσαμε τις γεωμετρίες για κάθε περίπτωση κοπής, και κατόπιν έγινε ψηφιακή επεξεργασία των φωτογραφιών αυτών με το εξειδικευμένο πρόγραμμα *Image pro plus*.

Για την σημασία της επιφανειακής τοπογραφίας έγινε διεξοδική αναφορά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η μέτρηση της τραχύτητας έγινε χρησιμοποιώντας το προφυλόμετρο στυλίσκου της *Taylor-Hobson surtonic3* το οποίο χρησιμοποιεί το μετρικό σύστημα Μ (Μέσης γραμμής) και είναι εφοδιασμένο με το λογισμικό *Talysprofile*.

4.2 Στερεοσκόπιο

Οι δύο κύριοι τύποι μικροσκοπίων που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι ο "συμβατικός" τύπος, συνήθως καλούμενος ως οπτικό μικροσκόπιο, και το στερεοσκοπικό μικροσκόπιο. Η κύρια διαφορά μεταξύ αυτών των δύο τύπων μικροσκοπίων είναι ότι το οπτικό μικροσκόπιο βλέπει το δείγμα από μια ενιαία κατεύθυνση, ενώ ο στερεοσκοπικός τύπος βλέπει το αντικείμενο από δύο ελαφρώς διαφορετικές γωνίες έτσι παρέχει τις δύο εικόνες που απαιτούνται για το στερεοσκοπικό είδωλο. Το στερεοσκοπικό μικροσκόπιο δίνει μια τρισδιάστατη

άποψη του αντικειμένου, ενώ το ίδιο αντικείμενο εμφανίζεται επίπεδο, όταν η θέαση γίνεται μέσω ενός οπτικού μικροσκοπίου. Αυτό ισχύει ακόμα και αν το οπτικό μικροσκόπιο έχει διοφθαλμική κεφαλή, επειδή κάθε μάτι βλέπει ακριβώς την ίδια εικόνα.



Εικόνα 4.1 Στερεοσκόπιο

Τόσο τα οπτικά μικροσκόπια όσο και τα στερεοσκοπικά χρησιμοποιούν το ανακλώμενο φως για να δημιουργήσουν το είδωλο τους. Η χαρακτηριστική διαφορά είναι ότι στα οπτικά μικροσκόπια η μεγέθυνση κυμαίνεται από 50 έως 1.200 φορές ενώ στο στερεοσκοπικό μικροσκόπιο η μεγέθυνση κυμαίνεται από 8 έως 50 φορές.

Ενώ αυτός ο προφανής περιορισμός της δύναμης μεγέθυνσης μπορεί να εμφανιστεί σαν ένα σημαντικό μειονέκτημα, η χαμηλότερη δύναμη μεγέθυνσης έχει τα πλεονεκτήματά της. Πράγματι, η σχετική αναλογία του πραγματικού αντικείμενου και του ειδώλου που προβάλλεται μέσω του στερεοσκοπικού μικροσκοπίου διατηρείται, καθιστώντας το στερεοσκόπιο ευκολότερο στη χρήση.

Τα στερεοσκοπικά μικροσκόπια χρησιμοποιούνται ευρέως από τους ερευνητές σε όλο τον κόσμο, στους τομείς όπως η εντομολογία, βοτανική, ορυκτολογία, μεταλλουργία συμπεριλαμβανομένων των εφαρμογών όπως η μικροχειρουργική, η μικροηλεκτρονική καθώς και άλλες εμπορικές και βιομηχανικές δραστηριότητες.

4.3 Image pro plus

Μια εικόνα είναι μια οπτική αντιπροσώπευση ενός αντικειμένου ή μιας ομάδας αντικειμένων. Το *Image pro plus* είναι ένα εξειδικευμένο πρόγραμμα ψηφιακής επεξεργασίας, η οποία είναι ένας συγκεκριμένος τύπος επεξεργασίας εικόνας που εκτελείται με έναν υπολογιστή. Οι φωτογραφικές εικόνες δεν είναι δυνατόν να αναλυθούν άμεσα από τον υπολογιστή επειδή οι υπολογιστές λειτουργούν με τις αριθμητικές και όχι εικονογραφικές πληροφορίες.

Προκειμένου να υποβληθεί σε επεξεργασία μια εικόνα από έναν υπολογιστή, η εικόνα πρέπει να μετατραπεί στην αριθμητική μορφή. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως ψηφιακή αναλογική μεταλλαγή εικόνας και αυτή είναι η αρμοδιότητα του *Image pro plus*.

Όταν μια πηγαία εικόνα, όπως μια φωτογραφία, ψηφιοποιείται, εξετάζεται με την μορφή πλέγματος. Έτσι κάθε εικονοστοιχείο (*pixel*) επιλέγεται χωριστά, και η φωτεινότητά του μετριέται και ποσοτικοποιείται. Αυτή η μέτρηση αντιστοιχείται στο εικονοστοιχείο, και είναι συνήθως ένας ακέραιος αριθμός, ο οποίος αντιπροσωπεύει τη φωτεινότητα της εικόνας σε εκείνο το σημείο. Αυτή η τιμή αποθηκεύεται στο αντίστοιχο εικονοστοιχείο του δυαδικού αρχείου εικόνας του υπολογιστή.

Όταν η εικόνα ψηφιοποιείται, το πλάτος και το ύψος της κάθε σειράς του πλέγματός επιλέγονται και καθορίζονται. Μαζί, το πλάτος του εικονοστοιχείου του δυαδικού αρχείου εικόνας και το ύψος είναι γνωστά ως η χωρική διάσπαση του.

Για να καταστεί δυνατή η μέτρηση μεγεθών από το *Image pro plus* πρέπει να δοθεί στο πρόγραμμα μια φωτογραφία η οποία παριστάνει γνωστό μήκος ή γωνία (ανάλογα το μέγεθος που θέλουμε να μετρήσουμε). Η εικόνα αυτή θα ψηφιοποιηθεί και θα διασπαστεί χωρικά, δίνοντας έτσι την δυνατότητα στο πρόγραμμα να δημιουργήσει ένα πρότυπο μέγεθος και να πραγματοποιήσει τις απαιτούμενες μετρήσεις.

4.4 Taylor-Hobson surtronic3+

Το *Surtronic3+* είναι ένα όργανο προηγμένης τεχνολογίας που αποδίδει μετρήσεις υψηλής ακρίβειας. Το όργανο έχει μεγάλη ευελιξία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί, είτε ως φορητό, είτε να συνδεθεί με υπολογιστή. Χρησιμοποιείται τόσο σε εργαστηριακές όσο και σε βιομηχανικές εφαρμογές και λόγω του μεγέθους του είναι πολύ εύχρηστο, ενώ έχει την δυνατότητα να πάρει μετρήσεις από κεκλιμένες ή κάθετες επιφάνειες.

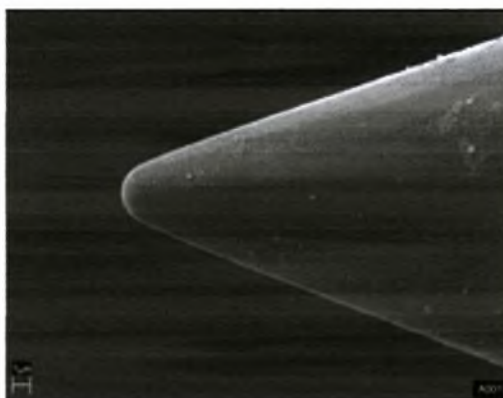


Εικόνα 4.2 Τραχύμετρο τύπου *Rank Taylor-Hobson Surtronic 3+*.

4.4.1 Αρχή λειτουργίας του surtomic3+

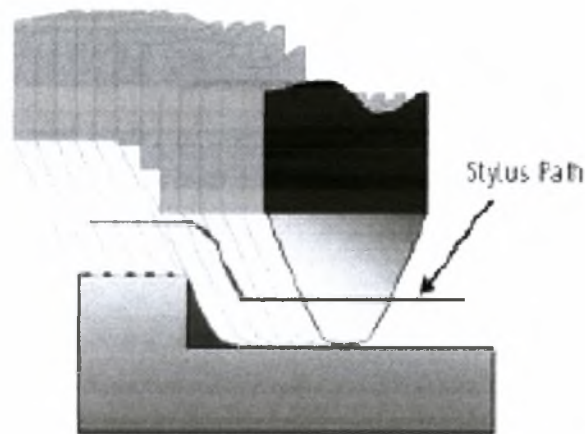
Όπως έχει προαναφερθεί το *surtomic3+* είναι ένα προφυλόμετρο στυλίσκου, δηλαδή χρησιμοποιεί μία ακίδα προκειμένου να πάρει μετρήσεις για την τραχύτητα μιας επιφάνειας. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε πώς λειτουργεί αυτή ακίδα, ποιοι είναι οι βασικοί παράμετροι της και πώς γίνεται η μέτρηση.

Η ακίδα έχει την μορφή παραβολοειδούς, είναι κατασκευασμένη από διαμάντι το οποίο έχει επεξεργασθεί κατάλληλα έτσι ώστε να έχει σφαιρικό τελείωμα. Για να πραγματοποιηθεί μία μέτρηση δεν χρησιμοποιείται όλο το εύρος της γεωμετρίας της ακίδας πάρα μόνο το σφαιρικό της τμήμα. Στην παρακάτω φωτογραφία μπορούμε να δούμε μία τυπική ακίδα σε μεγέθυνση.



Εικόνα 4.3 Ηλεκτρομικρογραφία μιας ακίδας 40° κατασκευασμένη από διαμάντι

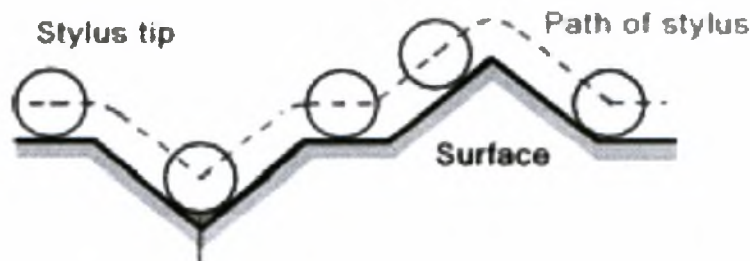
Η κωνικότητα της ακίδας είναι ιδιόζουσας σημασίας για την ακρίβεια της μέτρησης που θα ληφθεί, όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει και στην *εικόνα 4.4* που παριστάνει την μέτρηση ενός σκαλοπατιού. Έχει αναφερθεί και παραπάνω ότι τα στοιχεία που καταγράφονται από το όργανο μέτρησης προέρχονται από το σφαιρικό τμήμα της ακίδας. Όταν η κωνικότητα της ακίδας δεν είναι κατάλληλη, δεν καταγράφεται η πραγματική επιφάνεια. Αποτέλεσμα αυτού είναι να υπεισέρχεται ένα σημαντικό σφάλμα στις μετρήσεις, το οποίο θα μπορούσε να αποφευχθεί αν είχε χρησιμοποιηθεί κατάλληλη κωνικότητα.



Εικόνα 4.4 Μέτρηση επιφανειακής ανωμαλίας με ακίδα μεγάλης κωνικότητας

Εξίσου και ίσως πιο σημαντική για την ακρίβεια της μέτρησης είναι η διάμετρος του σφαιρικού τμήματος της ακίδας. Πιο συγκεκριμένα ο γεωμετρικός τύπος του κέντρου του σφαιρικού τμήματος της ακίδας συνιστά το προφίλ της επιφάνειας που παίρνουμε από το τραχύμετρο. Στην παρακάτω εικόνα μπορούμε να δούμε ποια είναι η πραγματική διαδρομή της ακίδας συγκρινόμενη με την πραγματική επιφανειακή ανωμαλία. Επίσης μπορούμε να παρατηρήσουμε το γεγονός ότι υπερεκτιμούνται οι κορυφές και υποεκτιμούνται οι κοιλάδες.

\



Εικόνα 4.5 Παρουσίαση της πραγματικής διαδρομής της ακίδας καθώς ανιχνεύει την επιφάνεια.

Για την αποφυγή του χάους που μπορεί να προέρθει από ασύμβατες μετρήσεις λόγω κακής εκτίμησης τόσο της κωνικότητας όσο και της διάμετρου του σφαιρικού τμήματος της ακίδας έχουν υιοθετηθεί τα πρότυπα ISO. Ο στόχος των προτύπων

αυτών είναι να εξασφαλίζεται ομοιομορφία αποτελεσμάτων ανεξάρτητα από τα όργανα που χρησιμοποιούνται για να γίνουν οι μετρήσεις. Στον τομέα της επιφάνειας έχει επικρατήσει το *ISO 3274*, το οποίο θα ακολουθήσουμε και εμείς στις μετρήσεις μας.

4.4.2 Talysprofile

Για την επεξεργασία των μετρήσεων που έγιναν στο τραχύμετρο χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα *Talysprofile 1.1.2* της ίδιας εταιρείας. Συνοπτικά τα βασικότερα χαρακτηριστικά του προγράμματος *Talysprofile* είναι τα εξής:

- Απεικόνιση τόσο του φιλτραρισμένου, όσο και του αφιλτράριστου περιγράμματος της επιφάνειας, με δυνατότητες επιλογής εναλλακτικών φίλτρων, αλλά και διαφόρων τιμών όσον αφορά το μήκος κύματος αποκοπής.
- Φασματική ανάλυση του περιγράμματος.
- Παρουσίαση της καμπύλης κατανομής του εύρους (amplitude distribution) και της καμπύλης φέρουσας επιφάνειας (*bearing area curve* ή *material ratio curve* ή *Abbott-Firestone curve*).
- Μέτρηση απόστασης μεταξύ δύο σημείων του περιγράμματος.
- Εμβαδομέτρηση σε επιλεγμένη περιοχή του περιγράμματος.
- Υπολογισμός πληθώρας παραμέτρων κατά τα διεθνή πρότυπα (π.χ. R_a , R_{sk}), αλλά και παραμέτρων κατά *DIN 4776* (R_k , R_p κ.α.) και κατά *ISO*. Όλες αυτές οι παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν σε φιλτραρισμένο και αφιλτράριστο περίγραμμα, αλλά και για το περίγραμμα της κυμάτωσης.

Πολύ σημαντική ρύθμιση για το *Talysprofile* είναι η επιλογή του φίλτρου. Το τελευταίο αποκόπτει τις χαμηλές συχνότητες της κυματομορφής όπως για παράδειγμα την κυμάτωση και τις ανωμαλίες της τραχύτητας. Παράλληλα μειώνει την επίδραση των ταλαντώσεων στο περίγραμμα χωρίς να χάνει ουσιώδεις πληροφορίες της επιφάνειας, ενώ ελαττώνει και το σφάλμα λόγω μη κατάλληλης τοποθέτησης του στυλίσκου, ο οποίος πρέπει να είναι όσο πιο κάθετος γίνεται σε σχέση με την μετρούμενη επιφάνεια.

Άλλη μία σημαντική παράμετρος είναι η αποκοπή (*cut-off*) η οποία σε γενικές γραμμές μπορεί να χαρακτηριστεί σαν ένα φίλτρο που χρησιμοποιείται ως μέσο

φιλτραρίσματος (αποκοπής) του μήκους κύματος. Η αποκοπή ανάλογα με την αριθμητική τιμή που έχει επιλεγεί αφαιρεί τα μήκη κύματος που δεν θέλουμε. Για παράδειγμα ένα φίλτρο αποκοπής με τιμή 0.8 mm, επιτρέπει στα μήκη κύματος κάτω από 0.8 mm να υπολογισθούν, ενώ τα μήκη κύματος πάνω από 0.8 mm μειώνονται σε πλάτος. Έτσι όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση του πλάτους.

4.5 MiniTab 14

Όπως αναφέρθηκε και στο τρίτο κεφάλαιο η στοχαστική μοντελοποίηση ενός μεγέθους είναι αρκετά επίπονη και πολλές φορές πρακτικά ανεφάρμοστη αν δεν διατίθεται το κατάλληλο υπολογιστικό πρόγραμμα. Για την διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό πακέτο *MiniTab*. Το οποίο εκτός από την στατιστική επεξεργασία μας δίνει την δυνατότητα να δημιουργήσουμε μια πληθώρα από διαγράμματα. Η δυνατότητα οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων μας δίνει μια συνολική εικόνα της δουλειάς μας και αφενός μας διευκολύνει να τα κατανοήσουμε ευκολότερα αφετέρου μας παρέχει την δυνατότητα να ερμηνεύσουμε σχέσεις και τάσεις που από μια απλή μαθηματική σχέση δεν είναι ευδιάκριτες.

Στην προσπάθεια μας να αναλύσουμε την διαδικασία της στοχαστικής μοντελοποίησης μέσω του στατιστικού πακέτου *MiniTab* παραθέτουμε συνοπτικά τα αποτελέσματα για την τραχύτητα σε χάλυβα Trip 700 (Η ανάλυση των αποτελεσμάτων θα ακολουθήσει σε επόμενο κεφάλαιο). Η ερμηνευτικές μεταβλητές έχουν που έχουν επιλεγεί είναι: η διάμετρος του ακροφυσίου (*Nozzle Diameter*), η απόσταση ακροφυσίου (*Stand of Distance*) και η ταχύτητα κοπής (*Travel Speed*).

4.5.1 Ανάλυση παλινδρόμησης

Για να ξεκινήσει η παλινδρόμηση πρέπει να επιλέξουμε ένα αρχικό μοντέλο, συνήθως επιλέγουμε το πλήρες πολυωνυμικό μοντέλο δευτέρου βαθμού (*Full Quadratic*), δηλαδή, με όλες τις κύριες επιδράσεις, τα τετράγωνα αυτών και όλες τις ανά δύο αλληλεπιδράσεις. Για το συγκεκριμένο πείραμα των τριών παραγόντων, το

αρχικό μοντέλο είναι το ακόλουθο:

$$Y_i = C_0 + C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + C_{12}X_1X_2 + C_{13}X_1X_3 + C_{23}X_2X_3 + C_{11}X_1^2 + C_{22}X_2^2 + C_{33}X_3^2$$

Η εκτίμηση των παραμέτρων γίνεται με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και από το πρόγραμμα περνούμε τον εξής πίνακα.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-14,092	5,085	-2,77	0,013
Noz Diam	27,190	7,148	3,80	0,001
St Off Dist	0,04835	0,02711	1,78	0,092
Tra Sp	0,00032	0,01446	0,02	0,983
Noz Diam*Noz Diam	-8,983	2,805	-3,20	0,005
St Off Dist*St Off Dist	-0,000044	0,000150	-0,30	0,770
Tra Sp*Tra Sp	0,000007	0,000021	0,33	0,745
Noz Diam*St Off Dist	-0,01479	0,01414	-1,05	0,310
Noz Diam*Tra Sp	-0,001886	0,005395	-0,35	0,731
St Off Dist*Tra Sp	0,000005	0,000039	0,12	0,905

$S = 0,514693$ $R-Sq = 90,12\%$ $R-Sq(adj) = 84,89\%$

Πίνακας 4.1 Ανάλυση παλινδρόμησης

Ο πίνακας αυτός μας δίνει τους συντελεστές του μοντέλου παλινδρόμησης (*coef*) ενώ η δεύτερη στήλη η (*SE Coef*) μας δείχνει την απόκλιση που υπάρχει όταν υπολογίζουμε τους συντελεστές.

Η στήλη T , P είναι έλεγχοι που εξετάζουν αν οι όροι του μοντέλου είναι στατιστικά σημαντικοί ή μη και μέσω αυτών εξετάζεται το ενδεχόμενο διαγραφής τους. Χαρακτηριστικά όσο πιο μεγάλο είναι το T τόσο πιο σημαντικός είναι ο όρος για την πρόβλεψη. Μέσω του P ελέγχουμε αν το μοντέλο χρειάζεται επαναπροσδιορισμό και ποιος από τους όρους πρέπει να διαγραφεί. Αν κάποιος όρος του μοντέλου έχει συντελεστεί P σε απόλυτη τιμή μεγαλύτερο από 0,05 τότε ο όρος αυτός διαγράφεται και το μοντέλο επαναπροσδιορίζεται.

Η τιμή S είναι ουσιαστικά το σ , η υπολογισμένη απόκλιση στο μοντέλο μας. Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι $S = MS Error$.

Η τιμή $R - Sq(R^2)$ αποτελεί ένα μέτρο του πόσο καλά το μοντέλο εξηγεί τα δεδομένα. Έχει ορισθεί ως το ποσοστό της συνολικής διακύμανσης των παρατηρήσεων της εξαρτημένης μεταβλητής που μπορεί να εξηγηθεί από την χρήση της παλινδρόμησης. Συμπεραίνουμε δηλαδή την προσαρμογή του προτύπου και πιο ποσοστό της ολικής μεταβλητότητας των δεδομένων που έχει ερμηνευτεί. Είναι

προφανές ότι όσο μεγαλύτερο (πιο «κοντά» στην μονάδα) είναι το R τόσο καλύτερο είναι το μοντέλο που έχουμε θεωρήσει, διότι ερμηνεύει μεγαλύτερο μέρος της παρατηρούμενης μεταβλητότητας. Η τιμή του $R - Sq$ υπολογίζεται από τη σχέση :

$$1 - \frac{SSE}{SST}$$

Το *Minitab 14* υπολογίζει και την ένδειξη $R - Sq$ (*Adj*), την ένδειξη δηλαδή του τροποποιημένου συντελεστή προσδιορισμού. Ο συντελεστής αυτός έχει την ιδιότητα να μην αυξάνεται με την προσθήκη όρων, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τον αριθμό των παρατηρήσεων όσο και τον αριθμό των ανεξάρτητων (μεταβλητών βαθμοί ελευθερίας). Η ποσότητα αυτή ονομάζεται συντελεστής προσδιορισμού προσαρμοσμένος για τους βαθμούς ελευθερίας (*coefficient of determination adjusted for degrees of freedom*) χρησιμοποιείται, ως μέτρο σύγκρισης δύο μοντέλων παλινδρόμησης με διαφορετικό αριθμό όρων (αφού, λόγω του ορισμού του), η τιμή του δεν επηρεάζεται από τον αριθμό των όρων κάθε μοντέλου.

Επίσης μας δίνεται και ο πίνακας ανάλυσης διακύμανσης:

Analysis of Variance for roughness, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Noz Diam	1	18,2784	3,1742	3,1742	16,79	0,000
St Off Dist	1	17,7266	17,7266	17,7266	93,79	0,000
Tra Sp	1	1,1001	1,1001	1,1001	5,82	0,025
Noz Diam*Noz Diam	1	2,2866	2,2866	2,2866	12,10	0,002
Error	22	4,1583	4,1583	0,1890		
Total	26	43,5500				

Πίνακας 4.2 Ανάλυση διακύμανσης

Η πρώτη στήλη του πίνακα της ανάλυσης μεταβλητότητας (*ANOVA*) δίνει τους βαθμούς ελευθερίας *DF* (*Degrees of freedom*).

Στην στη δεύτερη και τρίτη στήλη βλέπουμε το ολικό άθροισμα τετραγώνων *SS* ή *SST* (*Sum of Total Squares*) σε 2 διαφορετικές μορφές. Η πρώτη, η *Seq SS*, είναι το άθροισμα τετραγώνων για κάθε παράγοντα (*factor*). Αυτή εξαρτάται από τη σειρά την οποία οι παράγοντες μπαίνουν στο μοντέλο. Είναι δηλαδή η τιμή του *SS* ενός παράγοντα όταν έχουν δηλωθεί με μια συγκεκριμένη σειρά οι υπόλοιποι παράγοντες στο μοντέλο. Ενώ η τιμή της *Adj SS* δεν εξαρτάται από τη σειρά με την οποία οι παράγοντες μπαίνουν στο μοντέλο. Είναι δηλαδή η τιμή του *SS* όταν έχουν δοθεί όλοι οι άλλοι παράγοντες στο μοντέλο, αγνοώντας τη σειρά που έχουν δηλωθεί στο μοντέλο.

Η στήλη του *Adj MS* (*Adjusted mean square*) ρυθμιστή μέσω των τετραγώνων δίνεται από τη σχέση :

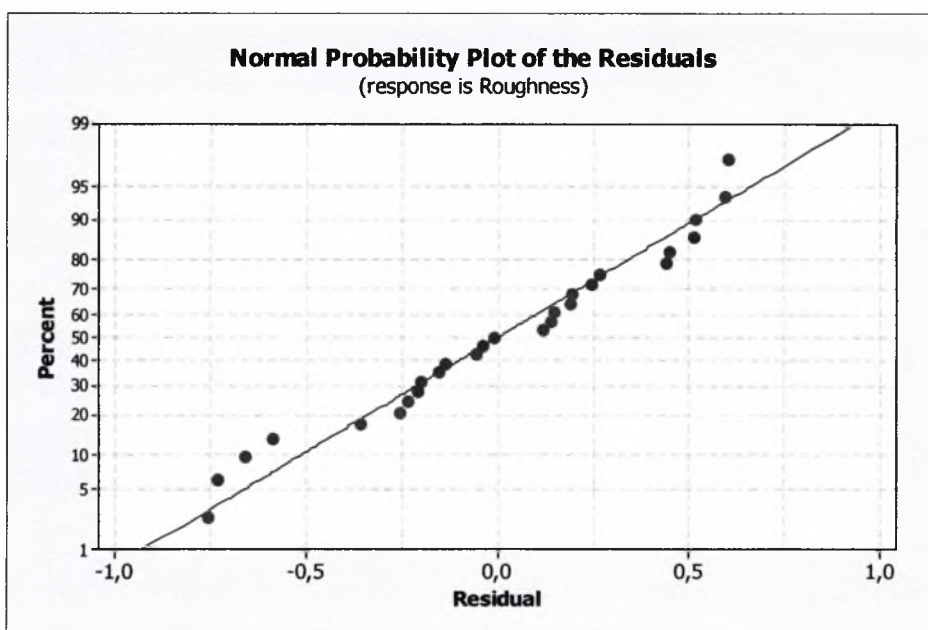
$$\text{Adj MS} = \frac{\text{Adj SS}}{\text{DF}}$$

Η στήλη των *F* χρησιμοποιείται για να δούμε αν οι όροι στο μοντέλο είναι σημαντικοί, δηλαδή αν παίζουν ρόλο ή όχι. Η τιμή των *F* δίνεται από την σχέση :

$$F = \frac{\text{Adj MS}}{\text{Ms Error}}$$

4.5.2 Διαγραμματική απεικόνιση καταλοίπων

Ο έλεγχος των υποθέσεων του μοντέλου, οι απαραίτητες δηλαδή συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτό για στατιστική συμπερασματολογία γίνεται μέσω των γραφημάτων των καταλοίπων που θα δούμε παρακάτω:

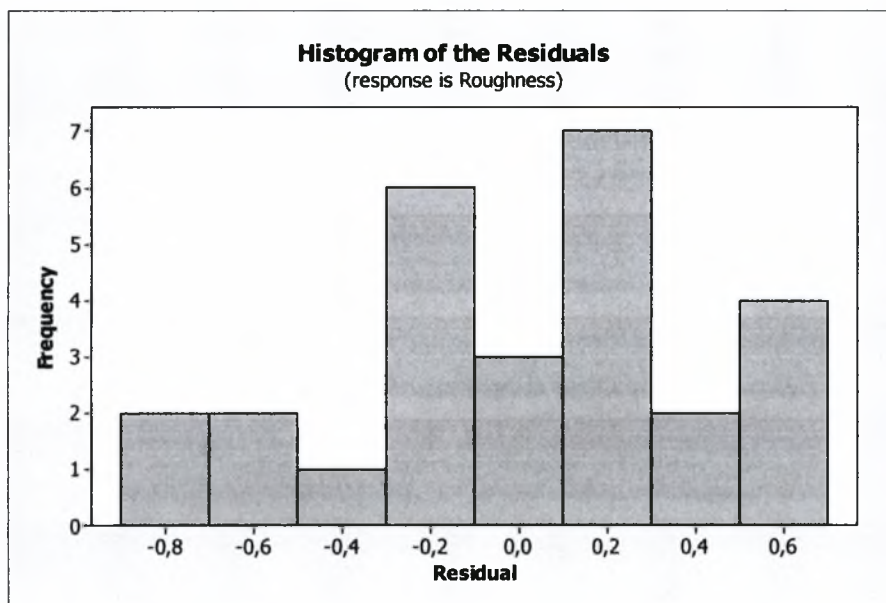


Εικόνα 4.6 Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας

Το σημαντικότερο, ίσως, από όλα τα διαγράμματα που κατασκευάζουμε για τα κατάλοιπα, είναι το διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (*Normal Probability Plot*), δηλαδή, το διάγραμμα που μας δείχνει κατά πόσο τα κατάλοιπα της εκτιμώμενης εξίσωσης ακολουθούν την κανονική κατανομή. Στο άξονα των *x* έχουμε τα υπόλοιπα (*residuals*) και στον άξονα των *y* έχουμε ένα % ποσοστό. Η μπλε ευθεία είναι η

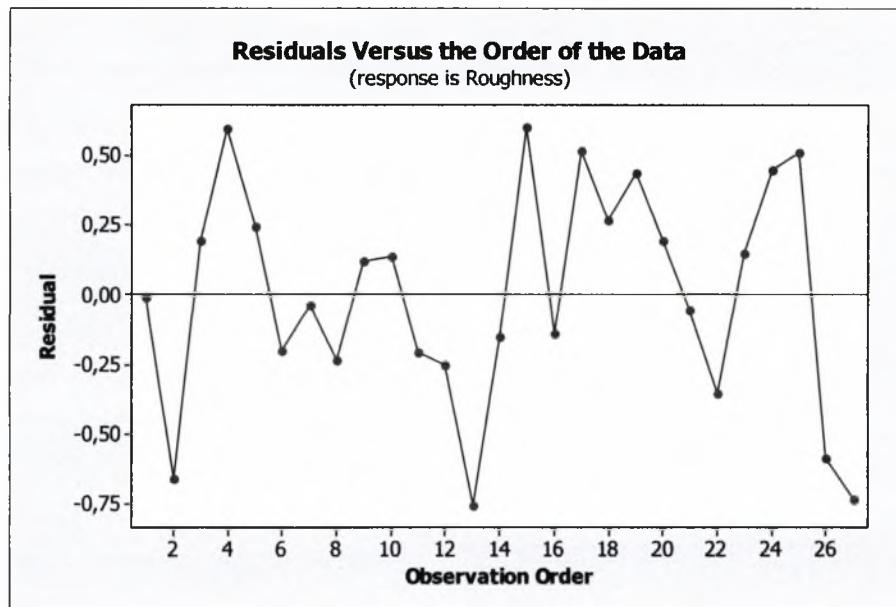
συνάρτηση αθροιστική κατανομής ενώ με κόκκινες τελείες συμβολίζονται τα υπόλοιπα. Μια σημαντική παρατήρηση είναι, ότι όσο περισσότερο τα υπόλοιπα τείνουν στην ευθεία της συνάρτησης αθροιστικής κατανομής, τόσο καλύτερα είναι τα αποτελέσματα που παίρνουμε μιας και οι τιμές των υπολοίπων θα μειώνονται. Ιδανική περίπτωση είναι αυτή που οι τιμές όλων των υπολοίπων πέφτουν πάνω στην ευθεία της συνάρτησης κανονικής κατανομής.

Ο έλεγχος της κανονικότητας των υπολοίπων μπορεί να ελεγχθεί και με το ιστόγραμμα των υπολοίπων (*Histogram of the Residuals*). Στο άξονα x έχουμε τα υπόλοιπα, ενώ στον άξονα y έχουμε τις συχνότητες (*frequency*). Δηλαδή το διάγραμμα αυτό δείχνει τον αριθμό των υπολοίπων (άξονας y) που συναντάμε σε ένα καθορισμένο διάστημα (άξονας x). Οι τιμές που πέφτουν ακριβώς στο όριο του διαστήματος, συμπεριλαμβάνονται πάντα στο δεξί από αυτό διάστημα.



Εικόνα 4.7 Ιστόγραμμα καταλοίπων.

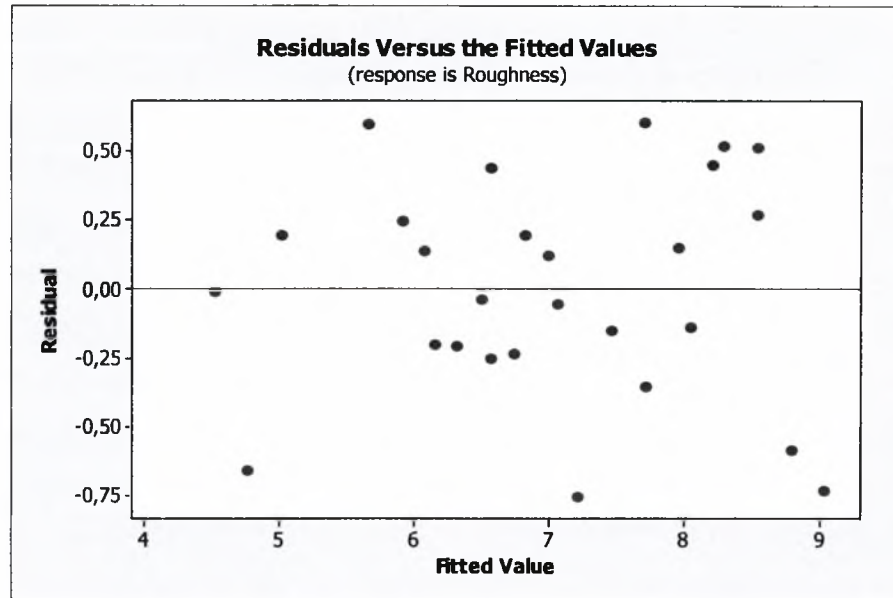
Για τον έλεγχο της σταθερότητας της διακύμανσης των καταλοίπων, εξετάζουμε αν τα κατάλοιπα είναι ανεξάρτητα από την σειρά με την οποία πήραμε τις παρατηρήσεις, χρησιμοποιώντας το διάγραμμα καταλοίπων σε σχέση με τη σειρά παρατήρησης (*Plot of Residuals Versus run Order*). Αν μελετώντας το διάγραμμα αυτό παρατηρήσουμε μια σχέση ανάμεσα στα κατάλοιπα, τότε υπάρχει πρόβλημα συσχέτισης(μη ανεξαρτησίας).



Εικόνα 4.8 Διάγραμμα υπολοίπων σε σχέση σειρά παρατήρησης

Στο άξονα των x λουπόν έχουμε τη σειρά των δεδομένων που έχουμε εισάγει, ενώ στον άξονα των y έχουμε τις τιμές των υπολοίπων. Τα σημεία θα πρέπει να διασκορπίζονται το ίδιο πάνω και κάτω από την οριζόντια γραμμή στο ύψος 0 και αυτό να συμβαίνει κατά μήκος όλης της γραμμής, διατηρώντας σταθερή την διακύμανση.

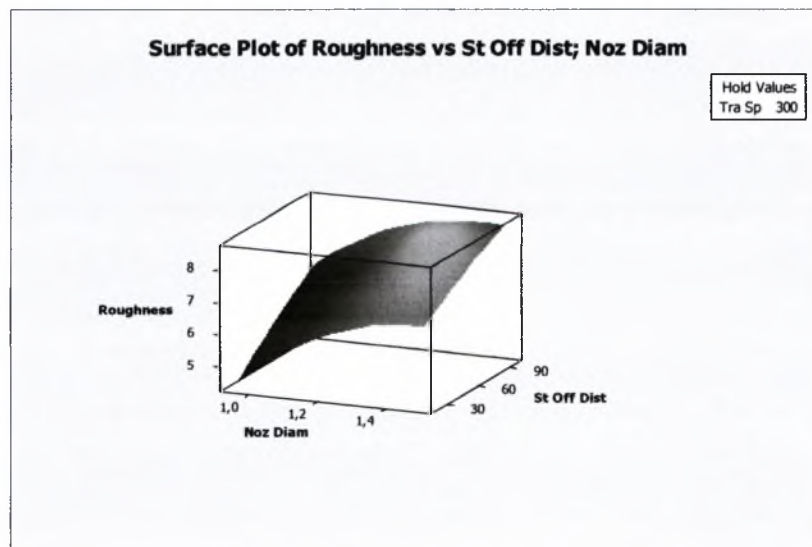
Για τον έλεγχο της ανεξαρτησίας των κατάλοιπων χρησιμοποιούμε το διάγραμμα κατάλοιπων σε σχέση με τις εκτιμώμενες τιμές (*Residuals Versus the Fitted Values*). Στο διάγραμμα αυτό σε κάθε εκτιμώμενη τιμή τοποθετούνται οι διακυμάνσεις των κατάλοιπων του αντίστοιχου επιπέδου. Για να μην υπάρχει πρόβλημα θα πρέπει τα κατάλοιπα να εμφανίζουν ομοιόμορφη κατανομή πάνω και κάτω από την γραμμή μηδενικού ύψους. Αν μελετώντας το διάγραμμα αυτό παρατηρήσουμε μια σχέση ανάμεσα στα κατάλοιπα, τότε υπάρχει πρόβλημα συσχέτισης(μη ανεξαρτησίας).



Εικόνα 4.9 Διάγραμμα καταλοίπων σε σχέση με τις εκτιμώμενες τιμές.

4.5.3 Επιφάνειες προσαρμογής

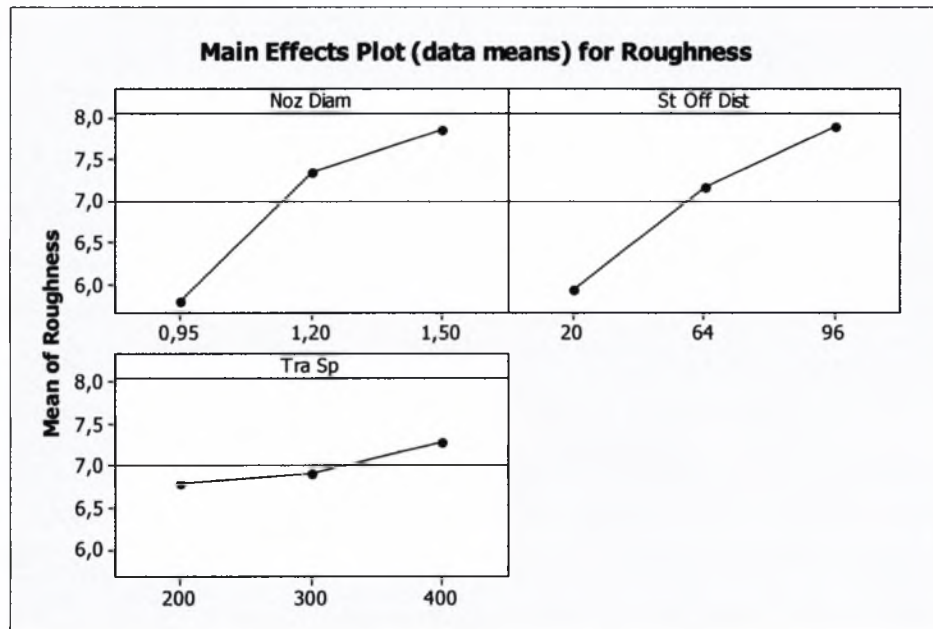
Οι επιφάνειες προσαρμογής ή απόκρισης, παρουσιάζουν τη συμπεριφορά της εξαρτημένης μεταβλητής, για κάθε συνδυασμό ανά δύο των παραγόντων, με βάση το στοχαστικό μοντέλο που έχει κατασκευαστεί. Οι παράγοντες που δεν συμπεριλαμβάνονται κάθε φορά στο διάγραμμα, κρατούνται σταθεροί σε ένα επίπεδο.



Εικόνα 4.10 Τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση της εξαρτημένης μεταβλητής και των ανεξάρτητων μεταβλητών

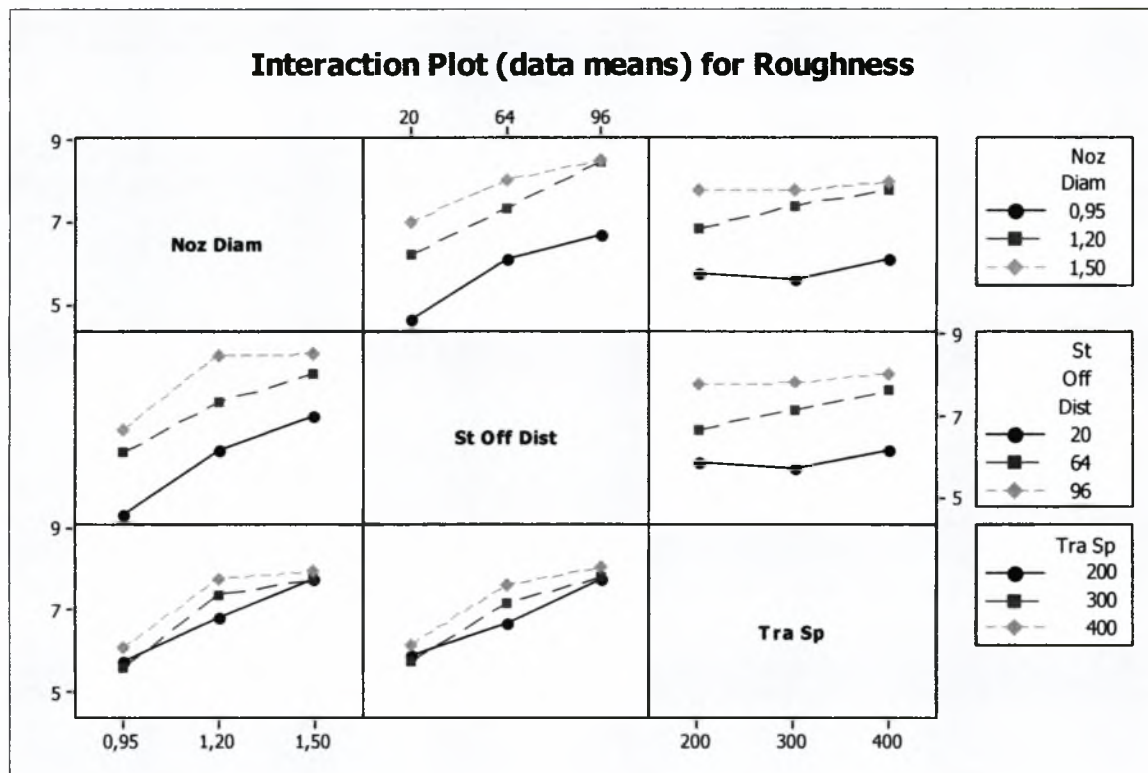
4.5.4 Διαγραμματική απεικόνιση κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων

Οι κύριες επιδράσεις ενός παράγοντα (*Main Effects Plot*) , Μια κύρια επίδραση εμφανίζεται όταν αλλάζει η εξαρτημένη μεταβλητή καθώς αλλάζουν τα επίπεδα μίας ερμηνευτικής μεταβλητής. Τα διαγράμματα αυτά χρησιμοποιούνται αποτελεσμάτων για να συγκριθεί τη σχετική ένταση της επίδρασης του κάθε παράγοντα.



Εικόνα 4.11 Διάγραμμα κύριων επιδράσεων

Η αλληλεπίδραση μεταξύ δυο παραγόντων αναφέρεται στο κατά πόσον οι κύριες επιδράσεις ενός παράγοντα είναι ίδιες σε όλα τα επίπεδα του άλλου παράγοντα. Αν αυτές είναι ίδιες, τότε αναφερόμαστε σε μη ύπαρξη αλληλεπίδρασης. Στα διαγράμματα των αλληλεπιδράσεων έχουμε στον x-άξονα τα επίπεδα των παραγόντων και στον y-άξονα τις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής. Αν οι ευθείες των παραγόντων είναι σχεδόν παράλληλες, τότε μάλλον δεν έχουμε πρόβλημα αλληλεπίδρασης. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόκλιση από την παραλληλότητα, τόσο μεγαλύτερη αλληλεπίδραση υπάρχει μεταξύ των παραγόντων.



Εικόνα 4.12 Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

5.1 Χαλύβες TRIP 800 HR-FH και 700 CR-FH

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μελέτη κοπής με πίδακα νερού υψηλής πίεσης σε δοκίμια χάλυβα TRIP 800 HR-FH και 700 CR-FH. Τόσο για τους χάλυβες TRIP, όσο και για το φαινόμενο πλαστικότητας μετασχηματισμού έχουμε αναφερθεί διεξοδικά στο πρώτο κεφάλαιο, έτσι κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούμε συγκεκριμένα στα δυο αυτά είδη χάλυβα και τις ιδιότητές τους .

Τα δοκίμια χάλυβα TRIP 800 HR-FH παρείχε προς διερεύνηση στο εργαστήριο υλικών του τμήματος η Γαλλική εταιρία ARCELOR, ενώ τα δοκίμια του TRIP 700 CR-FH προήλθαν από την Γερμανική TKS (*Thyssen Krupp Stahl*). Η χημική τους σύσταση φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Steel	C	Si	Mn	Al	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
TRIP 700 CR-FH	0.22	0.04	1.66	1.49	0.012	0.001	0.027	0.003	0.02	0.027
TRIP 800 HR-FH	0.21	1.53	1.78	0.04	0.009	0.003	0.026	0.01	----	0.014

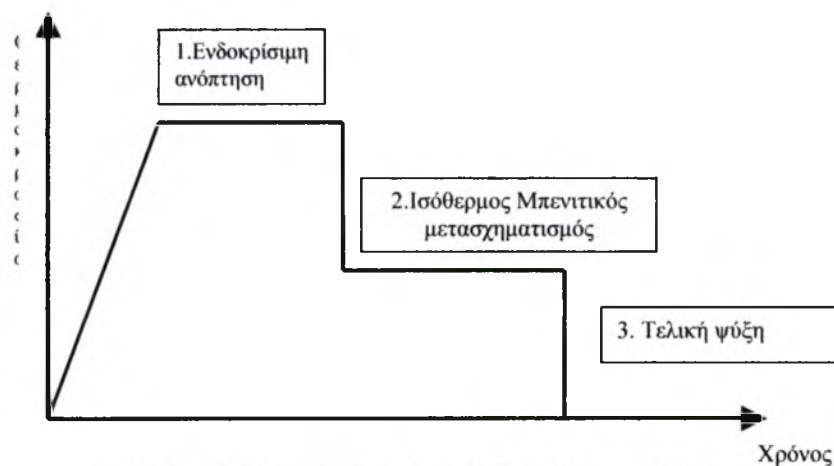
Πίνακας 5.1 Χημική σύσταση των χαλύβων TRIP 800 HR-FH και 700 CR-FH

Τα δοκίμια έχουν τετραγωνικό σχήμα και διαστάσεις 10x10 cm, οι διάφορες τους εντοπίζονται στο πάχος, στην σκληρότητα και στην μέθοδο παραγωγής τους.

Υλικό	TRIP 800 HR-FH	TRIP 700 CR-FH
Πάχος	1.25 mm	0.9 mm
Σκληρότητα	20 HRC	23 HRC
Μέθοδο παρασκευής	Θερμή Έλαση	Ψυχροί Έλαση

Πίνακας 5.2 Ιδιότητες χαλύβων TRIP 800 HR-FH και 700 CR-FH

Η θερμή και η ψυχρή έλαση είναι δύο μέθοδοι μορφοποίησης, όποιες ακολουθούν την ίδια θερμική επεξεργασία με την διαφορά όμως ότι στην μεν θερμή έλαση η θερμική επεξεργασία γίνεται κατά την διάρκεια την ελάσεως στη δε ψυχρή πραγματοποιείται μετά το πέρας της έλασης . Όπως μπορεί να φανεί και στο παρακάτω σχήμα οι χάλυβας TRIP διέρχονται από τρία στάδια θερμικής επεξεργασίας.

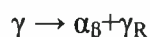


Εικόνα 5.1 Θερμική επεξεργασία χαλύβων TRIP

Στο πρώτο στάδιο, της ενδοκρίσιμης, έχουμε θέρμανση του χάλυβα στους $700-800\text{ }^{\circ}\text{C}$ και παραμένει εκεί από 60 έως 200 sec. Στο τέλος του πρώτου σταδίου έχουμε δομή αποτελούμενη από 50% φερίτη και 50% ωστενίτη.

Ακολουθεί απότομη ψύξη στους $300-450\text{ }^{\circ}\text{C}$ για να εισέλθουμε στο δεύτερο στάδιο, το στάδιο του ισόθερμου μπενιτικού μετασχηματισμού. Η χρονική διάρκεια

του κυμαίνεται από 100 έως 600 sec και σε αυτό το στάδιο έχουμε μετατροπή του μεγαλύτερου μέρους του ωστενίτη σε μαινίτη .

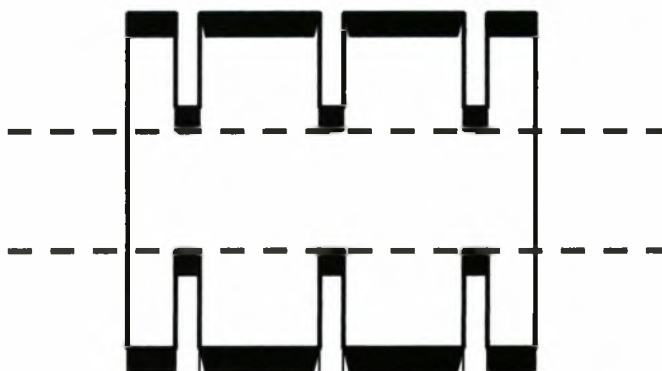


Όπου γ ωστενίτης, α_{β} μαινίτης και γ_R παραμένων ωστενίτης

Στο τρίτο στάδιο έχουμε απότομη ψύξη στην αρχική θερμοκρασία και η τελική σύνθεση της μικροδομής είναι: 50% φερίτης 35-45% μαινίτης και 5-15% παραμένων ωστενίτης. Ακολουθεί η επιβολή πλαστικών τάσεων κατά την οποία εμφανίζεται και το φαινόμενο TRIP (Πλαστικότητα Μετασχηματισμού)

5.2 Πειραματικές μετρήσεις

Όπως έχει προαναφερθεί το υλικό των δοκιμίων είναι χάλυβα TRIP 800 HR-FH και 700 CR-FH και έχουν σχήμα τετραγωνικό. Η κοπή έγινε με το σύστημα υδροκοπής της *SIELMAN HELLINIC HYDROJET*, και πιο συγκεκριμένα, όπως μπορεί να δει κανείς και στην εικόνα 5.2, έγιναν τρεις τομές μήκους 3cm στις δύο απέναντι πλευρές του δοκιμίου, η κάθε μια με διαφορετικές συνθήκες. Κατόπιν το δοκίμιο τεμαχίστηκε (κόκκινες διακεκομμένες γραμμές στην εικόνα 5.2) ώστε να καταστεί δυνατή η μέτρηση της τραχύτητας σε επιφάνεια κάθετη προς την επιφάνεια κατεργασίας.



Εικόνα 5.2 Μορφή των δοκιμίων

5.3 Παράμετροι κοπής

Για την πραγματοποίηση του στοχαστικού μοντέλου τα δοκίμια κατεργάστηκαν με τρεις διαφορετικές διαμέτρους ακροφυσίου (*Nozzle Diameter*), τρεις διαφορετικές αποστάσεις ακροφυσίου - τεμαχίου (*Stand of Distance*) και τρεις διαφορετικές ταχύτητες κοπτικού (*Travel Speed*). Συνοπτικά, οι παράγοντες του μοντέλου δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

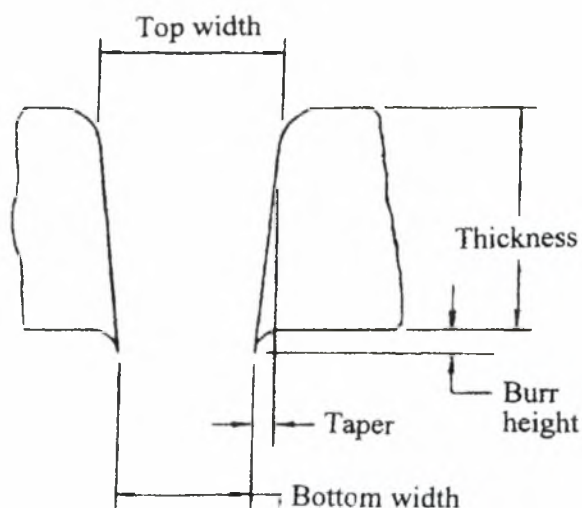
Παράγοντες Μοντέλου		
<i>Nozzle Diameter (mm)</i>	<i>Stand of Distance (mm)</i>	<i>Travel Speed (mm/min)</i>
X_1	X_2	X_3
0.95	20	200
1.2	64	300
1.5	96	400

Πίνακας 5.3 Παράγοντες στοχαστικού μοντέλου κοπής

5.4 Μετρήσεις αρμού κοπής και τραχύτητας

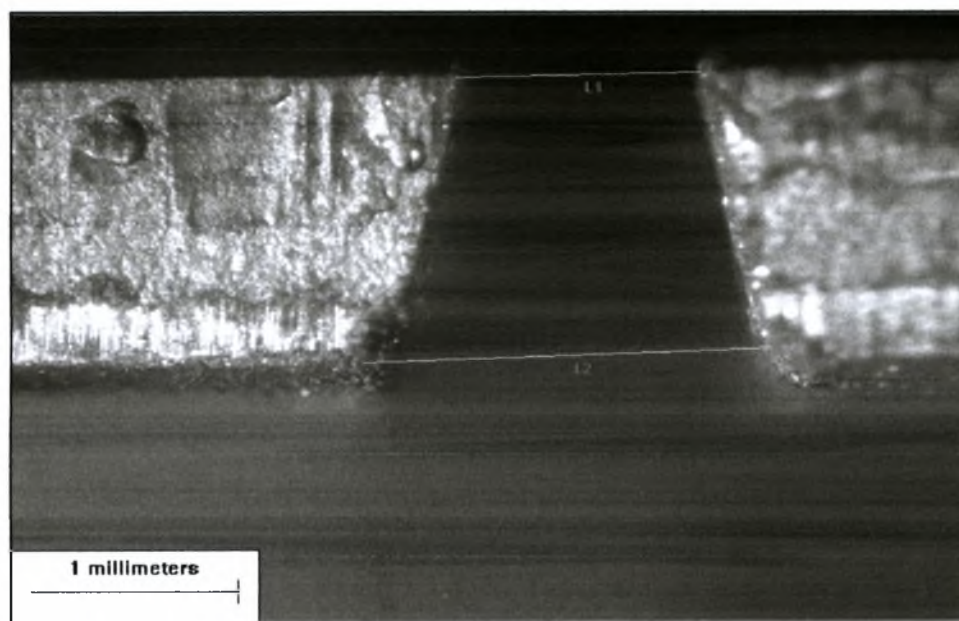
Για λόγους που έχουν εξηγηθεί σε προηγούμενο κεφαλαίο έχουμε επιλέξει ως εξαρτημένες μεταβλητές Y_1 , Y_2 για μέσο εύρος αρμού (*kerf*) και την τραχύτητα (*roughness*).

Όπως μπορεί κανείς να δει και στην εικόνα 5.4 ο αρμός κοπής παρουσιάζει μια κωνικότητα, για τον χαρακτηρισμό της κωνικότητας αυτής επιλέχτηκε το ημι-άθροισμα του εύρους κορυφής και κατώτερου σημείου.



Εικόνα 5.3 Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας του αρμού κοπής

Για να μπορέσουμε να διεξάγουμε αυτές τις μετρήσεις, τοποθετήσαμε τα δοκίμια στο στερεοσκόπιο με το επίπεδο κοπής κάθετο στον φακό και φωτογραφήσαμε τον κάθε αρμό χωριστά. Οι φωτογραφίες του TRIP 800 HR-FH τραβήχτηκαν με ενίσχυση 20x ενώ του TRIP 700 CR-FH με ενίσχυση 40x λόγω του μικρότερου πάχους του. Παρακάτω, μπορούμε να δούμε ενδεικτικά μια τέτοια φωτογραφία, ενώ οι υπόλοιπες θα παρατεθούν στο Παράρτημα.



Εικόνα 5.4 Μέτρηση της γεωμετρίας του αρμού κοπής

Τα αποτελέσματα που πήραμε από τις μετρήσεις αυτές παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες :

TRIP 800 HR-FH					
Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L ₁ (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L ₂ (mm)	Kerf (mm)
95	20	200	1,050589	0,781082	0,915834
0,95	20	300	1,049494	0,694612	0,872053
0,95	20	400	1,041898	0,6740846	0,857991
0,95	64	200	1,258419	0,9682196	1,113319
0,95	64	300	1,318912	0,8346878	1,0768
0,95	64	400	1,196878	0,7348019	0,96584
0,95	96	200	1,481809	0,8479576	1,164883
0,95	96	300	1,121134	0,7837332	0,952434
0,95	96	400	1,189078	0,6591651	0,924122
1,2	20	200	1,341611	1,027949	1,18478
1,2	20	300	1,38369	0,9675967	1,175643
1,2	20	400	1,297747	0,7988648	1,048306
1,2	64	200	1,51619	1,054983	1,285587
1,2	64	300	1,546966	1,09829	1,322628
1,2	64	400	1,46645	0,8350313	1,150741
1,2	96	200	1,832747	1,063231	1,447989
1,2	96	300	2,044533	0,8250095	1,434771
1,2	96	400	1,848184	0,6830564	1,26562
1,5	20	200	1,610482	1,09578	1,353131
1,5	20	300	1,581554	0,8683997	1,224977
1,5	20	400	1,629204	1,140252	1,384728
1,5	64	200	1,735316	1,2673	1,501308
1,5	64	300	1,751116	0,9455239	1,34832
1,5	64	400	1,89891	1,334515	1,616713
1,5	96	200	2,048307	1,128552	1,58843
1,5	96	300	1,971902	1,148196	1,560049
1,5	96	400	1,868182	1,165235	1,516709

Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα μετρήσεων *kerf* για χάλυβα TRIP 800 HR-FH

TRIP 700 CR-FH					
Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
0,95	20	200	1,013965	0,9421119	0,9780385
0,95	20	300	1,075429	0,9777677	1,0265984
0,95	20	400	0,9902815	0,9321296	0,9612056
0,95	64	200	1,241622	0,9888779	1,11525
0,95	64	300	1,307238	1,003575	1,1554065
0,95	64	400	1,229419	0,9477089	1,088564
0,95	96	200	1,300649	1,026047	1,163348
0,95	96	300	1,296681	0,9833708	1,1400259
0,95	96	400	1,228063	0,9360303	1,0820467
1,2	20	200	1,430681	1,270501	1,350591
1,2	20	300	1,405438	1,253436	1,329437
1,2	20	400	1,414585	1,256	1,3352925
1,2	64	200	1,505751	1,337488	1,4216195
1,2	64	300	1,491772	1,354475	1,4231235
1,2	64	400	1,447133	1,290046	1,3685895
1,2	96	200	1,801614	1,418444	1,610029
1,2	96	300	1,833188	1,281365	1,5572765
1,2	96	400	1,607525	1,287112	1,4473185
1,5	20	200	1,719299	1,582905	1,651102
1,5	20	300	1,52795	1,400982	1,464466
1,5	20	400	2,050071	1,428703	1,739387
1,5	64	200	2,034164	1,574037	1,8041005
1,5	64	300	2,145177	1,513054	1,8291155
1,5	64	400	2,190816	1,392974	1,791895
1,5	96	200	2,009841	1,59347	1,8016555
1,5	96	300	1,860714	1,559302	1,710008
1,5	96	400	1,953409	1,508535	1,730972

Πίνακας 5.5 Αποτελέσματα μετρήσεων *kerf* για χάλυβα TRIP 700 CR-FH

Η παράμετρος που θα χρησιμοποιήσουμε στην συγκεκριμένη διατριβή για τον χαρακτηρισμό της επιφανειακής τοπογραφίας των δοκιμίων, αποτελεί μια παράμετρο εύρους του περιγράμματος, που είναι από τις πλέον διαδεδομένες και χρήσιμες διεθνώς, και είναι η μέση αριθμητική τραχύτητα *Ra*

Για τον καθορισμού του μεγέθους χρησιμοποιήθηκε το προφیلόμετρο στυλίσκου *surtonic3+*. Το φίλτρο που επιλέχθηκε για το σύνολο των μετρήσεων τραχύτητας είναι το *Gaussian*. Το συγκεκριμένο φίλτρο δεν είναι ηλεκτρονικό, αλλά

μια μαθηματική συνάρτηση που εφαρμόζεται στα δεδομένα του περιγράμματος. Συγκεκριμένα είναι ένας μέσος όρος του εύρους του περιγράμματος, ο οποίος ακολουθεί κατανομή *Gauss*. Ενώ ως μήκος δειγματοληπτικό μήκος έχει επιλεγεί $L_n=4\text{mm}$

Πραγματοποιήθηκαν τρεις μετρήσεις σε κάθε πλευρά του αρμού και στην στατιστική επεξεργασία χρησιμοποιήσαμε το ημι-άθροισμα του μέσου όρου. Αναλυτικά, τα αποτελέσματα παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες :

TRIP 800 HR-FH					
Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Ra _{1μ} (μm)	Ra _{2μ} (μm)	Ra _M (μm)
0,95	20	200	5,5	4,5	5
0,95	20	300	5,6	5	5,3
0,95	20	400	5,8	6	5,9
0,95	64	200	6,6	5,4	6
0,95	64	300	6,4	5	5,7
0,95	64	400	7	6,4	6,7
0,95	96	200	6	6,2	6,1
0,95	96	300	6,4	6,2	6,3
0,95	96	400	6,6	6,6	6,6
1,2	20	200	6,2	6	6,1
1,2	20	300	6,5	6,1	6,3
1,2	20	400	6,9	5,5	6,2
1,2	64	200	6,9	6,7	6,8
1,2	64	300	7	6,4	6,7
1,2	64	400	7,2	6	6,6
1,2	96	200	6,5	7,2	6,85
1,2	96	300	7,3	6,8	7,05
1,2	96	400	7,5	6,5	7
1,5	20	200	6,8	5,4	6,1
1,5	20	300	6	5,4	5,7
1,5	20	400	6	5,5	5,75
1,5	64	200	7,2	6,2	6,7
1,5	64	300	7	6,7	6,85
1,5	64	400	7	6,5	6,75
1,5	96	200	7,6	6,5	7,05
1,5	96	300	7	6,6	6,8
1,5	96	400	7,1	6,7	6,9

Πίνακας 5.6 Αποτελέσματα μετρήσεων μέσης αριθμητικής τραχύτητας *Ra* για χάλυβα TRIP 800 HR-FH

TRIP 700 CR-FH					
Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Ra _{1μ} (μm)	Ra _{2μ} (μm)	Ra _M (μm)
0,95	20	200	5	4	4,5
0,95	20	300	5	3,2	4,1
0,95	20	400	5,6	4,8	5,2
0,95	64	200	7	5,5	6,25
0,95	64	300	5,7	6,6	6,15
0,95	64	400	6,2	5,7	5,95
0,95	96	200	6,4	6,5	6,45
0,95	96	300	7	6	6,5
0,95	96	400	7,2	7	7,1
1,2	20	200	6,6	5,8	6,2
1,2	20	300	6,2	6	6,1
1,2	20	400	6,6	6	6,3
1,2	64	200	6,6	6,3	6,45
1,2	64	300	7,2	7,4	7,3
1,2	64	400	8,6	8	8,3
1,2	96	200	9	6,8	7,9
1,2	96	300	9	8,6	8,8
1,2	96	400	9,6	8	8,8
1,5	20	200	7,5	6,5	7
1,5	20	300	8	6	7
1,5	20	400	7,8	6,2	7
1,5	64	200	7,7	7	7,35
1,5	64	300	8,2	8	8,1
1,5	64	400	8,7	8,6	8,65
1,5	96	200	7,5	10,6	9,05
1,5	96	300	8,2	8,2	8,2
1,5	96	400	8,6	8	8,3

Πίνακας 5.7 Αποτελέσματα μετρήσεων μέσης αριθμητικής τραχύτητας *Ra* για χάλυβα TRIP 700 CR-FH

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΟΥ ΑΡΜΟΥ ΚΟΠΗΣ ΓΙΑ ΧΑΛΥΒΑ TRIP 800 HR-FH

6.1 Κατάρτιση στοχαστικού μοντέλου

Όπως έχουμε αναφέρει και στο τέταρτο κεφάλαιο για να αρχίσει η ανάλυση παλινδρόμησης πρέπει να επιλέξουμε ένα αρχικό μοντέλο. Στην παρούσα διατριβή έχει επιλεγεί το πλήρες πολυωνυμικό μοντέλο δευτέρου βαθμού:

$$Y_i = C_0 + C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + C_{12}X_1X_2 + C_{13}X_1X_3 + C_{23}X_2X_3 + C_{11}X_1^2 + C_{22}X_2^2 + C_{33}X_3^2$$

Με βάση την μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων το πρόγραμμα προσπαθεί να εκτιμήσει τις παραμέτρους C_i και δίνει τον παρακάτω πίνακα :

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,3624	0,6840	-0,53	0,603
Noz Diam	2,2828	0,9615	2,37	0,030
St Off Dist	0,004616	0,003646	1,27	0,223
Tra Sp	-0,002765	0,001944	-1,42	0,173
Noz Diam*Noz Diam	-0,8186	0,3774	-2,17	0,045
St Off Dist*St Off Dist	-0,000022	0,000020	-1,07	0,300
Tra Sp*Tra Sp	0,000001	0,000003	0,53	0,605
Noz Diam*St Off Dist	0,002186	0,001902	1,15	0,266
Noz Diam*Tra Sp	0,001484	0,000726	2,04	0,057
St Off Dist*Tra Sp	-0,000007	0,000005	-1,33	0,202

S = 0,0692325 R-Sq = 94,01% R-Sq(adj) = 90,85%

Πίνακας 6.1 Ανάλυση παλινδρόμησης του πλήρους πολυωνυμικού μοντέλου για το μέσο εύρος αρμού (*kerf*) του χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Από την ανάλυση παλινδρόμησης παρατηρούμε ότι, η *P-value* του όρου *Tra Sp*Tra Sp* είναι αρκετά υψηλή (0.605), ώστε να μπορεί να διαγραφεί. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα του ακροφύσιου υψωμένη στο τετράγωνο φαίνεται να έχει πολύ μικρή

επιρροή στην γεωμετρία του αρμού κοπής. Στην προσπάθεια μας να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο που να εξηγεί καλύτερα την διακύμανση των παρατηρήσεων της εξαρτημένης μεταβλητής επαναπροσδιορίζουμε το μοντέλο συνεχώς, διαγράφοντας σταδιακά όλους* τους όρους του μοντέλου που έχουν $P\text{-value} \geq 0,05$. Έτσι, καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα :

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,5971	0,6213	-0,96	0,348
Noz Diam	2,4139	0,9486	2,54	0,019
St Off Dist	0,004815	0,001618	2,98	0,007
Tra Sp	-0,001871	0,000945	-1,98	0,062
Noz Diam*Noz Diam	-0,8186	0,3749	-2,18	0,041

S = 0,0687872 R-Sq = 93,05% R-Sq(adj) = 90,96%

Πίνακας 6.2 Ανάλυση παλινδρόμησης του προσαρμοσμένου ποκωνυμικού μοντέλου για μέσο εύρος (*kerf*) αρμού του χάλυβα TRIP 800 HR-FH

6.2 Επιλογή στοχαστικού μοντέλου

Οι έλεγχοι $P\text{-value}$ έχουν σαν στόχο να μας οδηγήσουν σε βελτιώσεις στο μοντέλο μας , αυτό όμως δεν συνεπάγεται ότι μετά το πέρας του ελέγχου αυτού θα έχουμε καταλήξει και στο καταλληλότερο και γενικότερο μοντέλο. Η επιλογή του μοντέλου όπως έχει προαναφερθεί γίνεται με βάση την τιμή του τροποποιημένου συντελεστή προσδιορισμού $R - Sq (Adj)$. Βάσει αυτού του κριτηρίου η εκτίμηση των συντελεστών του μοντέλου παλινδρόμησης δίνονται από τον πίνακα 6.3

* Κατά τον επαναπροσδιορισμό του μοντέλου μπορούν να διαγραφούν όλοι οι όροι εκτός από τις ερμηνευτικές μεταβλητές ,*Nozzle Diameter, Stand of Distance, Travel Speed*. Αυτό γιατί αποτελούν τους κύριους παράγοντες την επίδραση των οποίων θέλουμε να αναλύσουμε.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,4375	0,6308	-0,69	0,496
Noz Diam	2,2828	0,9468	2,41	0,026
St Off Dist	0,002156	0,002786	0,77	0,449
Tra Sp	-0,001871	0,000937	-2,00	0,060
Noz Diam*Noz Diam	-0,8186	0,3716	-2,20	0,040
Noz Diam*St Off Dist	0,002186	0,001873	1,17	0,258
Noz Diam*Tra Sp	0,001484	0,000715	2,08	0,052
St Off Dist*Tra Sp	-0,000007	0,000005	-1,35	0,193

S = 0,0681733 R-Sq = 93,51% R-Sq(adj) = 91,12%

Πίνακας 6.3 Ανάλυση παλινδρόμησης του μοντέλου , με τον μεγαλύτερο τροποποιημένο συντελεστή προσδιορισμού για μέσο εύρος αρμού (*kerf*) TRIP 800 HR-FH

Ο παραπάνω πίνακας μας οδηγεί στο στοχαστικό μοντέλο:

$$Y_{I \text{ (TRIP 800)}} = -0,4375 + 2,2828X_1 + 0,002156X_2 - 0,001871X_3 - 0,8186 X_1^2 + 0,002186 X_1X_2 + 0,001484 X_1X_3 - 0,000007 X_2 X_3$$

Από τις ελεγχουσυναρτήσεις T παρατηρούμε ότι στατιστικά σημαντικότεροι παράγοντες είναι η διάμετρος (*Noz. Diam.*) και η ταχύτητα του ακροφυσίου (*Trav. Sp.*) ενώ ακολουθεί με πολύ μικρότερο βαθμό σημαντικότητας η απόσταση κοπής (*St. Of Dis*). Πρέπει να δοθεί έμφαση, επίσης στην υψηλή σημαντικότητα που παρουσιάζουν οι αλληλεπιδράσεις *Noz Diam*St Off Dist*, *Noz Diam*Tra Sp*, *St Off Dist*Tra Sp* έναντι του παράγοντα της απόσταση κοπής (*St. Of Dis*).

Από τον πίνακα παλινδρόμησης βλέπουμε ότι ο συντελεστής προσδιορισμού *R-Sq* και ο τροποποιημένος συντελεστής προσδιορισμού *R-Sq(adj)* είναι αρκετά υψηλοί 93,51% και 91,12% αντίστοιχα, πράγμα που φανερώνει ότι το μοντέλο έχει πολύ καλή προσαρμογή.

Η ανάλυση διακύμανσης για το τελικό μοντέλο είναι η ακόλουθη :

Analysis of Variance for Kerf, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Noz Diam	1	0,97852	0,02702	0,02702	5,81	0,026
St Off Dist	1	0,19507	0,00278	0,00278	0,60	0,449
Tra Sp	1	0,04202	0,01854	0,01854	3,99	0,060
Noz Diam*Noz Diam	1	0,02256	0,02256	0,02256	4,85	0,040
Noz Diam*St Off Dist	1	0,00633	0,00633	0,00633	1,36	0,258
Noz Diam*Tra Sp	1	0,02004	0,02004	0,02004	4,31	0,052
St Off Dist*Tra Sp	1	0,00846	0,00846	0,00846	1,82	0,193
Error	19	0,08830	0,08830	0,00465		
Total	26	1,36130				

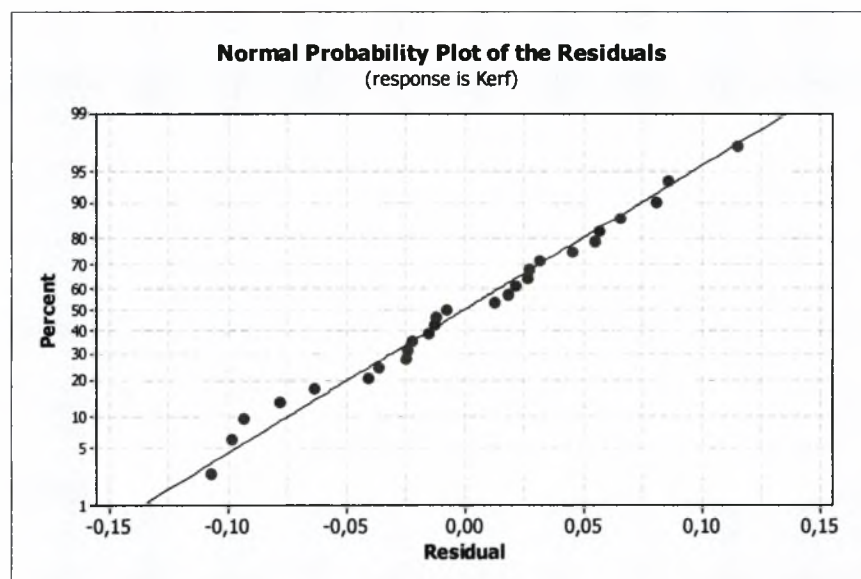
Πίνακας 6.4 Ανάλυση διακύμανσης του στοχαστικού μοντέλου για το μέσο εύρος αρμού(*kerf*) κοπής χάλυβα TRIP 800 HR-FH

6.3 Γραφήματα καταλοίπων

Μέσω των γραφημάτων των καταλοίπων θα γίνει ο έλεγχος των υποθέσεων του μοντέλου. Δηλαδή, θα ελεγχθεί αν πληρούνται οι απαραίτητες προϋποθέσεις, έτσι ώστε να καταστεί δυνατό να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο για στατιστική συμπερασματολογία.

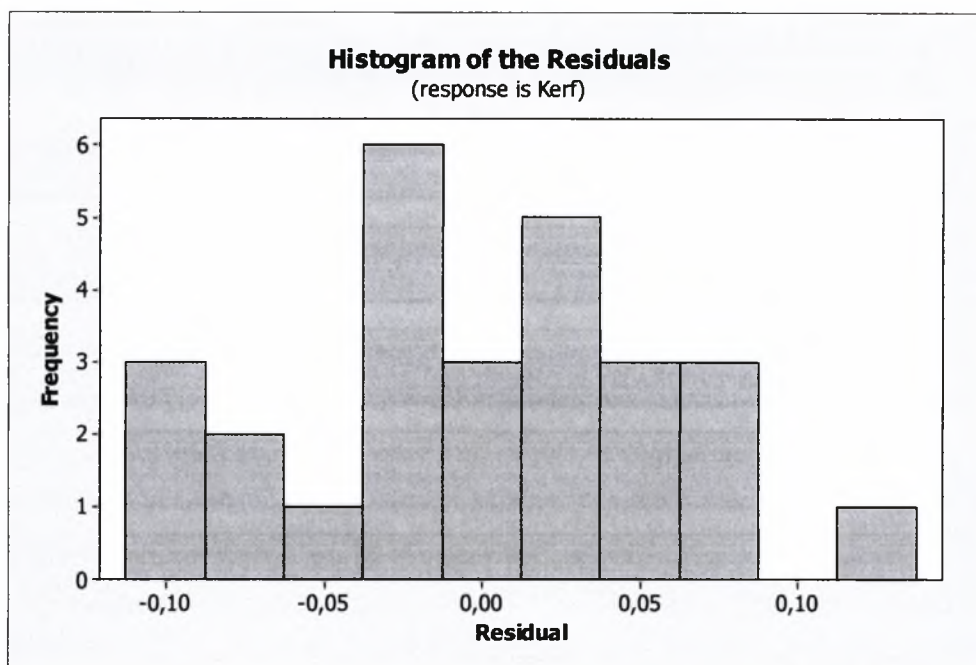
- Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας

Από το διάγραμμα έλεγχου κανονικότητας, θα εξετάσουμε αν τα κατάλοιπα του μοντέλου ακολουθούν την κανονική κατανομή



Εικόνα 6.1 Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας των καταλοίπων για το *kerf* χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Όπως με σαφήνεια μπορεί να φανεί και στο διάγραμμα, τα κατάλοιπα κινούνται πολύ κοντά στην κανονική κατανομή. Με δεδομένο αυτό μπορούμε με ασφάλεια να υποθέσουμε ότι τα κατάλοιπα ακολουθούν την κανονική κατανομή. Αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί και από το ιστόγραμμα των υπολοίπων (*Histogram of the Residuals*).

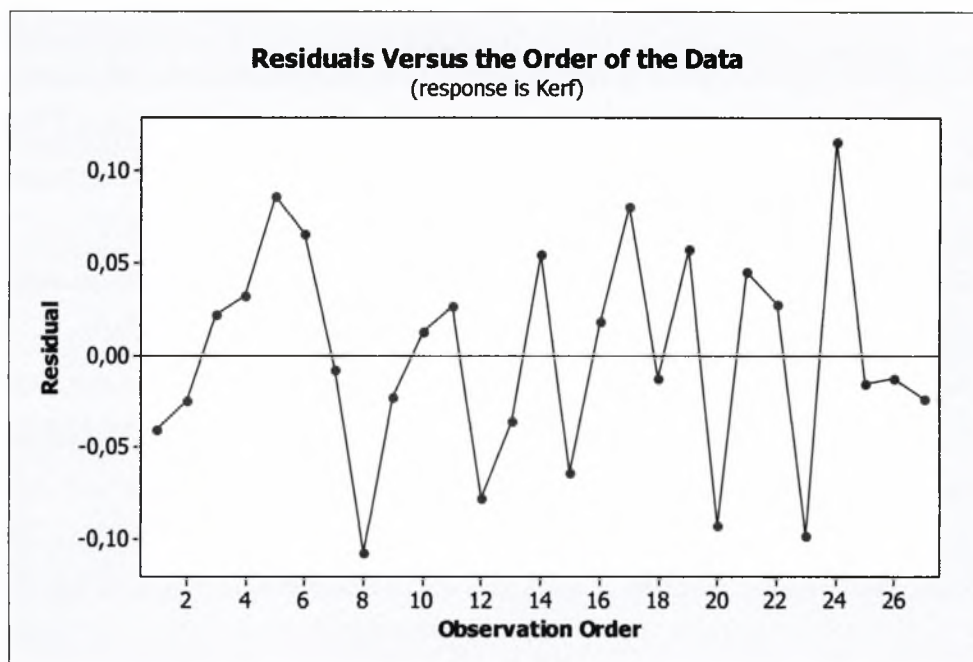


Εικόνα 6.2 Ιστόγραμμα των υπολοίπων για το *kerf* χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Πράγματι, όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει και στο ιστόγραμμα, η μεγαλύτερη συχνότητα υπολοίπων από την κανονική κατανομή κυμαίνεται από -0.04 έως 0.04 και υπάρχει σχετικά ομοιόμορφη κατανομή υπολοίπων, πράγμα που ενισχύει την πιστότητα της υπόθεσης ότι τα κατάλοιπα ακολουθούν την κανονική κατανομή.

- Διάγραμμα υπολοίπων σε σχέση με τη σειρά παρατήρησης (*Residuals Versus the Order of the Data*).

Από το διάγραμμα καταλοίπων ως προς την σειρά παρατηρήσεων θα εξετάσουμε την σταθερότητα διακύμανσης των αποτελεσμάτων.

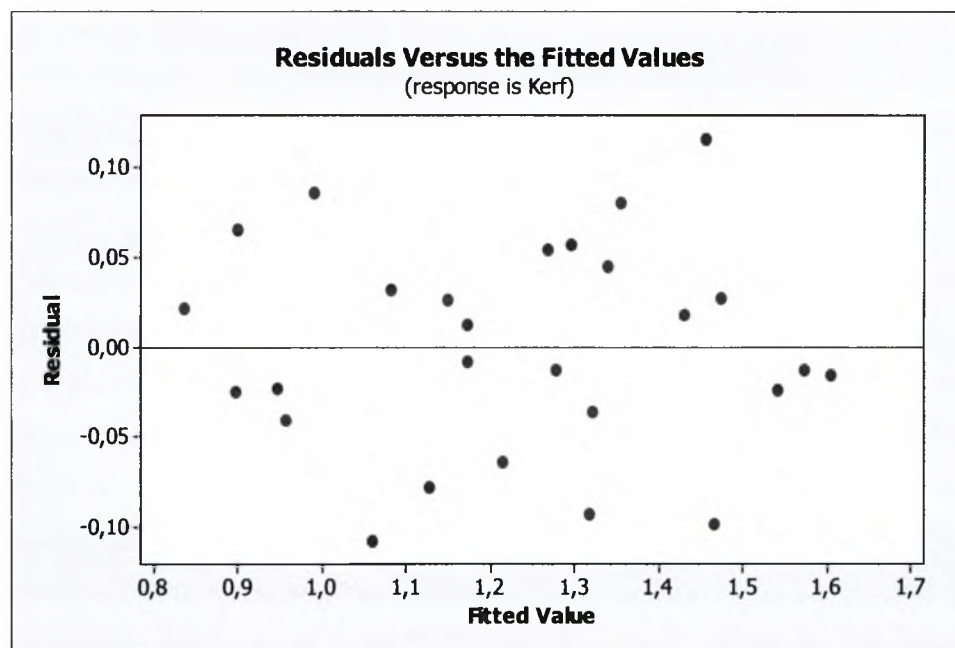


Εικόνα 6.3 Διάγραμμα υπολοίπων σε σχέση σειρά παρατήρησης για *kerf* χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Διακρίνουμε ότι το διάγραμμα είναι αρκετά ικανοποιητικό. Γενικά έχουμε αρκετές αποκλίσεις, όμως το εύρος τους είναι αρκετά μικρό για να επηρεάσει την σταθερότητα διακύμανσης των αποτελεσμάτων. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις εντοπίζονται στις παρατηρήσεις 8, 20, 23.

- Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμώμενες τιμές (*Residuals Versus the Fitted Values*).

Από το διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμώμενες τιμές θα εξετάσουμε αν τα κατάλοιπα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Επίσης, μπορούμε να ανιχνεύσουμε και πιθανές ασυνήθιστες παρατηρήσεις.



Εικόνα 6.4 Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμώμενες τιμές για *kerf* χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Από το διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα κατάλοιπα δεν ακολουθούν κάποιο πρότυπο (σχέση), δηλαδή κατανέμονται τυχαία πάνω και κάτω από το 0, γεγονός που μας οδηγεί ασφαλώς στο συμπέρασμα ότι τα κατάλοιπα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Αφού εξετάσαμε όλα τα διαγράμματα καταλοίπων και εξασφάλισαμε ότι πληρούνται οι αναγκαίες προϋποθέσεις, είμαστε πλέον έτοιμοι να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο που αναπτύξαμε για στατιστική συμπερασματολογία.

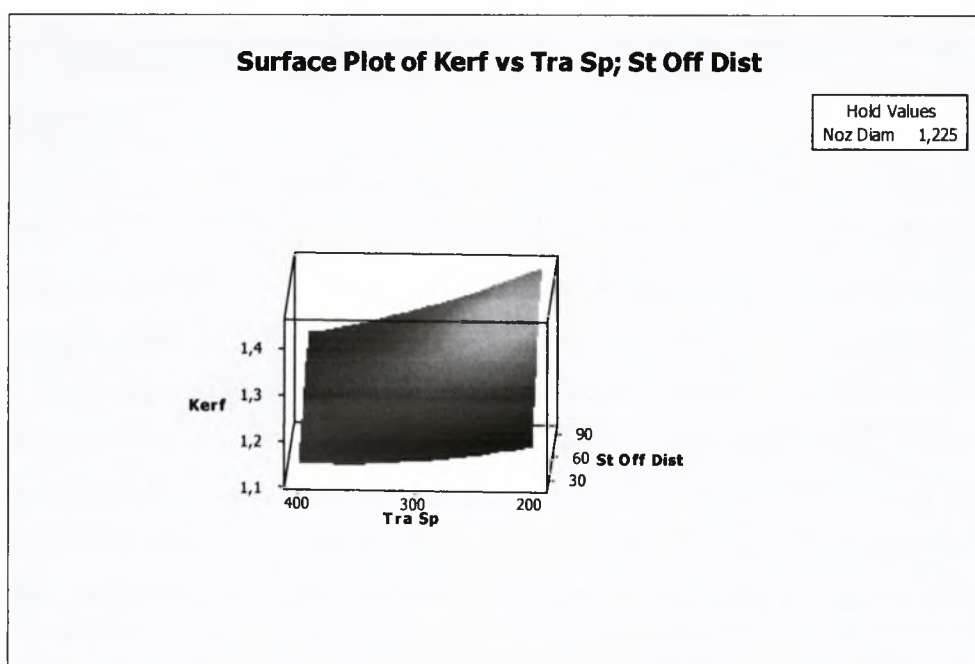
6.4 Επιφάνειες προσαρμογής

Με τις επιφάνειες προσαρμογής, θα εξετάσουμε γραφικά τη συμπεριφορά της εξαρτημένης μεταβλητής, του μέσου εύρους (*kerf*) για κάθε συνδυασμό ανά δύο των παραγόντων, με βάση το στοχαστικό μοντέλο που έχει καταρτιστεί. Οι παράγοντες

που δεν συμπεριλαμβάνονται κάθε φορά στο διάγραμμα, κρατούνται σταθεροί σε ένα επίπεδο.

Οι επιφάνειες προσαρμογής του στοχαστικού μοντέλου του μέσου εύρους είναι οι ακόλουθες:

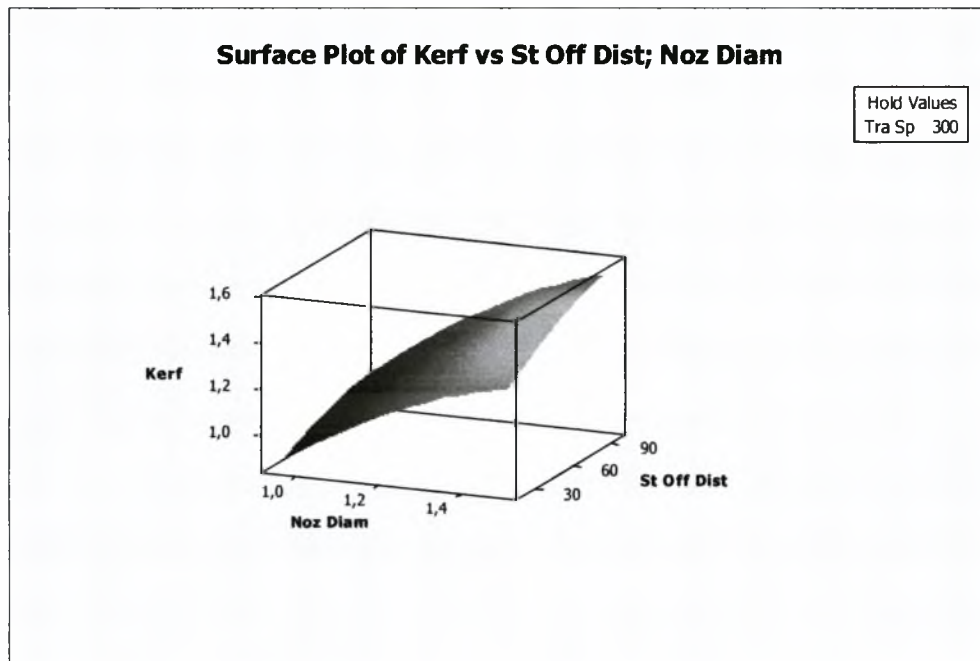
- Στο πρώτο διάγραμμα θα παρατηρήσουμε την συμπεριφορά του μέσου εύρους σε σχέση με την ταχύτητα και την απόσταση κοπής, ενώ η διάμετρος του ακροφυσίου έχει κρατηθεί σταθερή στην τιμή 1,225mm. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η αύξηση της ταχύτητας κοπής και η αύξηση της απόστασης έχουν θετική επίδραση στο μέσο εύρος. Όμως, όπως είναι ευδιάκριτο, η αύξηση της ταχύτητας κοπής έχει πολύ μικρότερη επίδραση.



Εικόνα 6.5 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνισης της εξαρτημένης μεταβλητής *kerf* και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Trav. Sp.* και *St Off Dist* σε χάλυβα TRIP 800 HR-FH

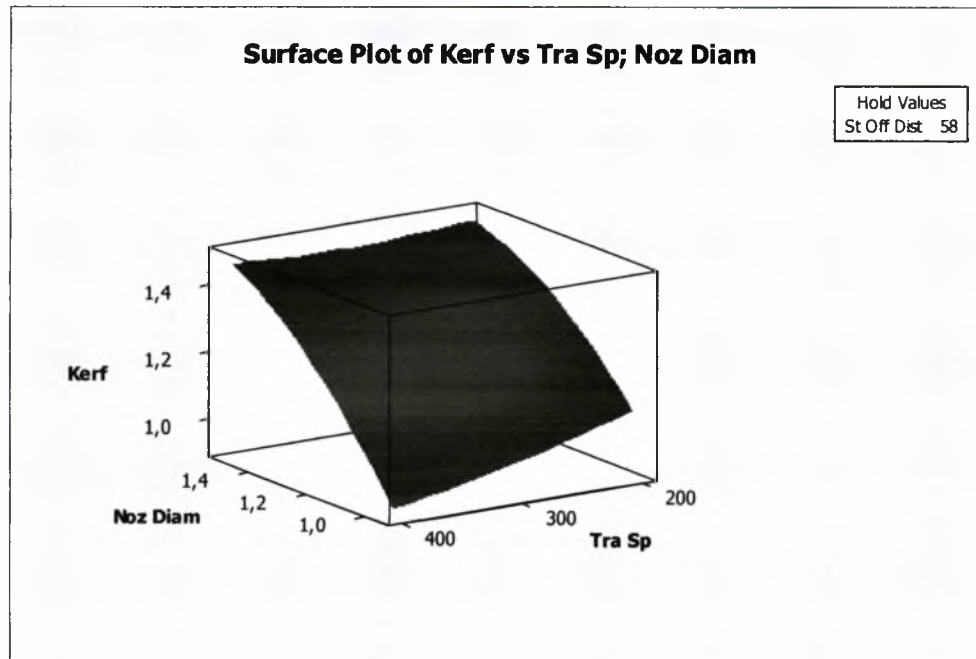
- Στο επόμενο διάγραμμα θα δούμε την συμπεριφορά του μέσου εύρους σε σχέση με την απόσταση κοπής και την διάμετρο του ακροφυσίου, ενώ η

ταχύτητα κοπής έχει κρατηθεί σταθερή στην τιμή (300mm/min). Μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η αύξηση της διαμέτρου του ακροφυσίου και η αύξηση της απόστασης κοπής έχουν θετική επίδραση στο μέσο εύρος. Όμως όπως είναι ευδιάκριτο η αύξηση της απόστασης κοπής έχει πολύ μικρότερη επίδραση. Επίσης αξιοσημείωτο είναι, ότι η επίδραση της διαμέτρου του ακροφυσίου μειώνεται καθώς αυξάνει η τιμή της



Εικόνα 6.6 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνισης της εξαρτημένης μεταβλητής *kerf* και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Noz Diam.* και *St Off Dist.* σε χάλυβα TRIP 800 HR-FH

- Στο επόμενο διάγραμμα θα παρατηρήσουμε την συμπεριφορά του μέσου εύρους σε σχέση με την ταχύτητα κοπής και την διάμετρο του ακροφυσίου, ενώ η απόσταση κοπής έχει κρατηθεί σταθερή στην τιμή 58(mm). Μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η αύξηση της διαμέτρου του ακροφυσίου και η αύξηση της ταχύτητα κοπής έχουν θετική επίδραση στο μέσο εύρος. Όμως, όπως είναι ευδιάκριτο η αύξηση της απόστασης κοπής έχει πολύ μικρότερη επίδραση. Επίσης αξιοσημείωτο είναι, ότι η επίδραση της διαμέτρου του ακροφυσίου μειώνεται καθώς αυξάνει η τιμή της



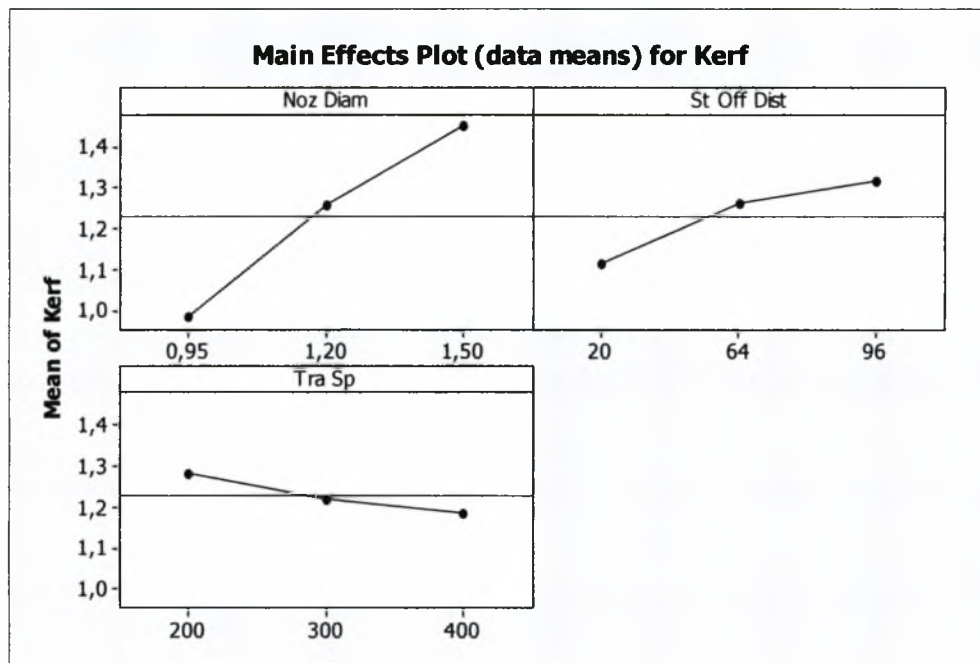
Εικόνα 6.7 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνισης της εξαρτημένης μεταβλητής *kerf* και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Noz Diam.* και *Trav. sp.* σε χάλυβα TRIP 800 HR-FH

6.5 Διαγράμματα κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων

Θα ολοκληρώσουμε την στατιστική ανάλυση μας με την παρουσίαση και ερμηνεία των διαγραμμάτων κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων

- Κύριες επιδράσεις παραγόντων

Οι κυρίες επιδράσεις κάθε παράγοντα θα παρουσιαστούν στο παρακάτω διάγραμμα, όπου σε κάθε επίπεδο τού κάθε παράγοντα έχουμε αντιστοιχίσει τον μέσο των παρατηρήσεων στο αντίστοιχο επίπεδο.



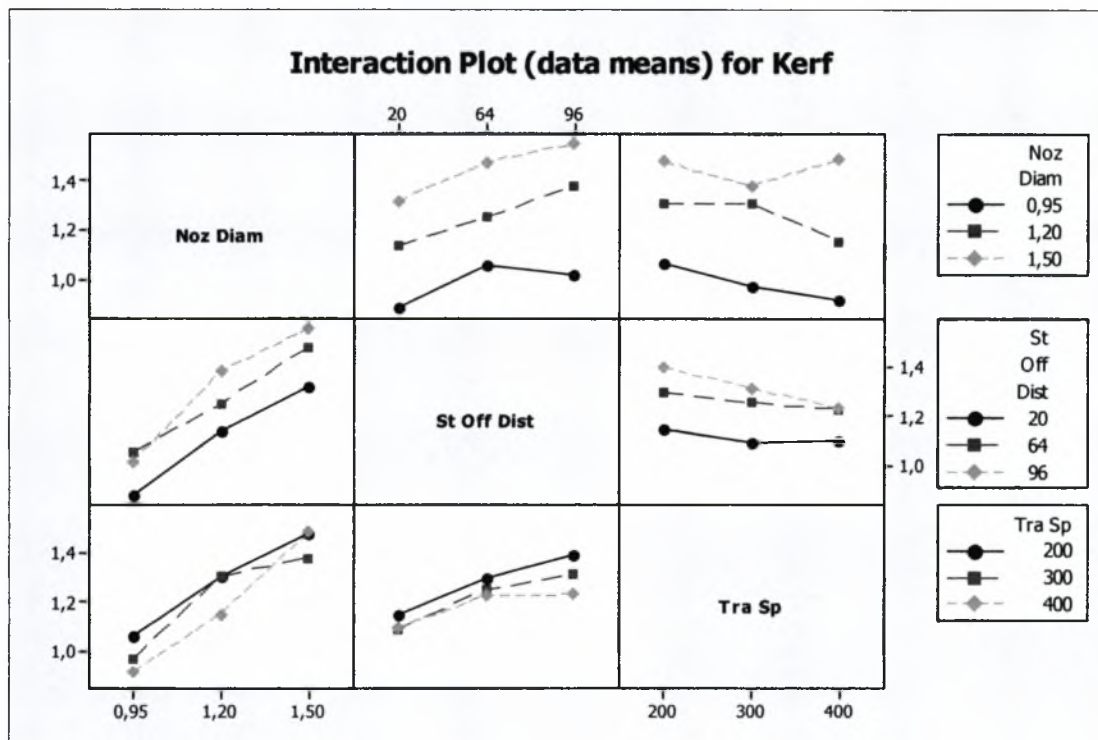
Εικόνα 6.8 Διάγραμμα κύριων επιδράσεων κάθε παράγοντα για το *kerf* χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Από το διάγραμμα μπορεί κανείς εύκολα να διαπιστώσει ότι οι κύριες επιδράσεις των δύο πρώτων παραγόντων επιφέρουν θετική επίδραση στις τιμές του μέσου εύρους, καθώς μεταφερόμαστε σε υψηλότερα επίπεδα. Η επίδραση όμως της αύξησης της διαμέτρου του ακροφυσίου είναι αρκετά πιο σημαντική από την αύξηση της απόστασης κοπής. Αντίθετα με τους δύο πρώτους παράγοντες, ο τρίτος έχει αρνητική επίδραση στις τιμές του μέσου εύρους, καθώς μεταφερόμαστε σε υψηλότερα επίπεδα. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι έχει την ασθενέστερη επίδραση εκ των τριών παραγόντων. Αν παρατηρήσει προσεκτικά κανείς τα διαγράμματα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνισης σε συνδυασμό με το διάγραμμα κύριων επιδράσεων θα διαπιστώσει μια αντίφαση. Στα μεν διαγράμματα τρισδιάστατης απεικόνισης η αύξηση της ταχύτητας κοπής έχει θετική επίδραση στο μέσο εύρος ενώ στο διάγραμμα κύριων επιδράσεων η επίδραση της ταχύτητας κοπής είναι αρνητική. Η αντίφαση αυτή έγκειται στο γεγονός ότι στα διαγράμματα τρισδιάστατης απεικόνισης λαμβάνονται υπόψιν και οι αλληλεπιδράσεις των παραγόντων που θα παρουσιαστούν παρακάτω.

- Αλληλεπιδράσεις παραγόντων

Από τα διαγράμματα των αλληλεπιδράσεων των παραγόντων, θα εξετάσουμε κατά πόσον οι κύριες επιδράσεις ενός παράγοντα είναι ίδιες σε όλα τα επίπεδα του άλλου παράγοντα. Αν αυτές είναι ίδιες, τότε αναφερόμαστε σε μη ύπαρξη αλληλεπίδρασης.

Στα διαγράμματα των αλληλεπιδράσεων έχουμε στον x-άξονα τα επίπεδα των παραγόντων και στον y-άξονα τις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής. Αν οι ευθείες των παραγόντων είναι σχεδόν παράλληλες, τότε μάλλον δεν έχουμε πρόβλημα αλληλεπίδρασης, ενώ αν οι ευθείες τέμνονται, τότε είναι σχεδόν βέβαιο ότι οι παράγοντες αλληλεπιδρούν.



Εικόνα 6.9 Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων κάθε παράγοντα για το *kerf* χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Για την διάμετρο του ακροφυσίου δεν υπάρχει διασταύρωση των γραμμών, όμως οι ευθείες των παραγόντων δεν είναι παράλληλες. Συμπεραίνουμε, έτσι, ότι οι παράγοντες αλληλεπιδρούν, αλλά χωρίς υψηλή στατιστική σημαντικότητα.

Για την απόσταση και την ταχύτητα κοπής εμφανίζεται διασταύρωση των γραμμών, γεγονός που σημαίνει ότι οι παράγοντες αλληλεπιδρούν με υψηλή στατιστική σημαντικότητα.

Εν κατακλείδι, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι, τα συμπεράσματα από την γραφική ανάλυση, συμβαδίζουν με τα συμπεράσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης και διακύμανσης, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία του στοχαστικού μοντέλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΟΥ ΑΡΜΟΥ ΚΟΠΗΣ ΓΙΑ ΧΑΛΥΒΑ TRIP 700 CR-FH

7.1 Κατάρτιση στοχαστικού μοντέλου

Όπως και για την κατάρτιση στοχαστικού μοντέλου για τον χάλυβα TRIP 700 HR-FH για να αρχίσει η ανάλυση παλινδρόμησης επιλέξαμε ως αρχικό, το πλήρες πολωνυμικό μοντέλο δευτέρου βαθμού:

$$Y_i = C_0 + C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + C_{12}X_1X_2 + C_{13}X_1X_3 + C_{23}X_2X_3 + C_{11}X_1^2 + C_{22}X_2^2 + C_{33}X_3^2$$

Με βάση την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων το πρόγραμμα προσπαθεί να εκτιμήσει τις παραμέτρους C_i και δίνει τον παρακάτω πίνακα :

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-1,1867	0,5513	-2,15	0,046
Noz Diam	2,7449	0,7749	3,54	0,003
St Off Dist	0,008340	0,002938	2,84	0,011
Tra Sp	-0,000133	0,001567	-0,08	0,933
Noz Diam*Noz Diam	-0,6599	0,3041	-2,17	0,044
St Off Dist*St Off Dist	-0,000024	0,000016	-1,48	0,157
Tra Sp*Tra Sp	-0,000000	0,000002	-0,07	0,943
Noz Diam*St Off Dist	-0,001021	0,001533	-0,67	0,514
Noz Diam*Tra Sp	0,000425	0,000585	0,73	0,477
St Off Dist*Tra Sp	-0,000008	0,000004	-1,89	0,076

S = 0,0557953 R-Sq = 97,51% R-Sq(adj) = 96,19%

Πίνακας 7.1 Ανάλυση παλινδρόμησης του πλήρους πολωνυμικού μοντέλου για μέσο εύρος Αρμού (*kerf*) του χάλυβα TRIP 700 HR-FH

Από την ανάλυση παλινδρόμησης παρατηρούμε ότι, η *P-value* του όρου *Tra Sp*Tra Sp* είναι αρκετά υψηλή (0.943), ώστε να μπορεί να διαγραφεί. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα του ακροφύσιου υψωμένη στο τετράγωνο φαίνεται να έχει πολύ μικρή

επιρροή στην γεωμετρία του αρμού κοπής. Στην προσπάθειά μας να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο που να εξηγεί καλύτερα την διακύμανση των παρατηρήσεων της εξαρτημένης μεταβλητής επαναπροσδιορίζουμε το μοντέλο συνεχώς, διαγράφοντας σταδιακά όλους* τους όρους του μοντέλου που έχουν $P\text{-value} \geq 0,05$. Έτσι, καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα :

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,0802	0,2567	-0,31	0,758
Noz Diam	1,0615	0,1958	5,42	0,000
St Off Dist	0,004351	0,001413	3,08	0,006
Tra Sp	-0,000233	0,000826	-0,28	0,781
Noz Diam*Tra Sp	0,000425	0,000630	0,67	0,507
St Off Dist*Tra Sp	-0,000008	0,000005	-1,76	0,094

S = 0,0600859 R-Sq = 96,43% R-Sq(adj) = 95,58%

Πίνακας 7.2 Ανάλυση παλινδρόμησης του προσαρμοσμένου πολυωνυμικού μοντέλου για μέσο εύρος αρμού(*kerf*) του χάλυβα TRIP 700 HR-FH

7.2 Επιλογή στοχαστικού μοντέλου

Όπως έχει αναφερθεί, οι έλεγχοι $P\text{-value}$ έχουν σαν στόχο να μας οδηγήσουν σε βελτιώσεις στο μοντέλο μας , αυτό όμως δεν συνεπάγεται ότι μετά το πέρας του ελέγχου αυτού θα έχουμε καταλήξει και στο καταλληλότερο και γενικότερο μοντέλο. Η επιλογή του μοντέλου όπως έχει προαναφερθεί γίνεται με βάση την τιμή του τροποποιημένου συντελεστή προσδιορισμού $R - Sq (Adj)$. Βάσει αυτού του κριτηρίου οι εκτιμήσεις των συντελεστών του μοντέλου παλινδρόμησης δίνονται από τον πίνακα 7.3

* Κατά τον επαναπροσδιορισμό του μοντέλου εξακολουθεί να ισχύει ότι μπορούν να διαγραφούν όλοι οι όροι εκτός από τις ερμηνευτικές μεταβλητές ,Nozzle Diameter, Stand of Distance,Travel Speed.Και αυτό γιατί αποτελούν τους κύριους παράγοντες την επίδραση των οποίων θέλουμε να αναλύσουμε.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-1,1729	0,5031	-2,33	0,032
Noz Diam	2,7449	0,7532	3,64	0,002
St Off Dist	0,008340	0,002856	2,92	0,009
Tra Sp	-0,000233	0,000745	-0,31	0,758
Noz Diam*Noz Diam	-0,6599	0,2956	-2,23	0,039
St Off Dist*St Off Dist	-0,000024	0,000016	-1,52	0,145
Noz Diam*St Off Dist	-0,001021	0,001490	-0,69	0,502
Noz Diam*Tra Sp	0,000425	0,000569	0,75	0,464
St Off Dist*Tra Sp	-0,000008	0,000004	-1,95	0,068

S = 0,0542318 R-Sq = 97,51% R-Sq(adj) = 96,40%

Πίνακας 7.3 Ανάλυση παλινδρόμησης του μοντέλου, με τον μεγαλύτερο τροποποιημένο συντελεστή προσδιορισμού για μέσο εύρος αρμού (*kerf*) χάλυβα TRIP 700 HR-FH

Ο παραπάνω πίνακας μας οδηγεί στο στοχαστικό μοντέλο:

$$Y_{1(\text{TRIP 700})} = -1,1729 + 2,7449X_1 + 0,002156X_2 - 0,008340X_3 - 0,6599X_1^2 - 0,000024X_2^2 - 0,001021X_1X_2 - 0,000425X_1X_3 - 0,000008X_2X_3$$

Από τις ελεγχοσυναρτήσεις T παρατηρούμε ότι στατιστικά σημαντικότεροι παράγοντες είναι: η διάμετρος (*Noz. Diam.*) και η απόσταση κοπής (*St. Of Dis*), ενώ ακολουθεί με πολύ μικρότερο βαθμό σημαντικότητας η ταχύτητα κοπής (*Trav. Sp.*). Πρέπει να δοθεί έμφαση, επίσης στην υψηλή σημαντικότητα που παρουσιάζουν οι αλληλεπίδραση *St Off Dist*Tra Sp* έναντι του παράγοντα της ταχύτητας κοπής (*Trav. Sp.*).

Από τον πίνακα παλινδρόμησης βλέπουμε ότι ο συντελεστής προσδιορισμού *R-Sq* και ο τροποποιημένος συντελεστής προσδιορισμού *R-Sq(adj)* είναι αρκετά υψηλοί 97,51% και 96,40% αντίστοιχα, γεγονός που φανερώνει ότι το μοντέλο έχει πολύ καλή προσαρμογή.

Η ανάλυση διακύμανσης για το τελικό μοντέλο είναι η ακόλουθη :

Analysis of Variance for Kerf, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Noz Diam	1	0,97852	0,02702	0,02702	5,81	0,026
St Off Dist	1	0,19507	0,00278	0,00278	0,60	0,449
Tra Sp	1	0,04202	0,01854	0,01854	3,99	0,060
Noz Diam*Noz Diam	1	0,02256	0,02256	0,02256	4,85	0,040
Noz Diam*St Off Dist	1	0,00633	0,00633	0,00633	1,36	0,258
Noz Diam*Tra Sp	1	0,02004	0,02004	0,02004	4,31	0,052
St Off Dist*Tra Sp	1	0,00846	0,00846	0,00846	1,82	0,193
Error	19	0,08830	0,08830	0,00465		
Total	26	1,36130				

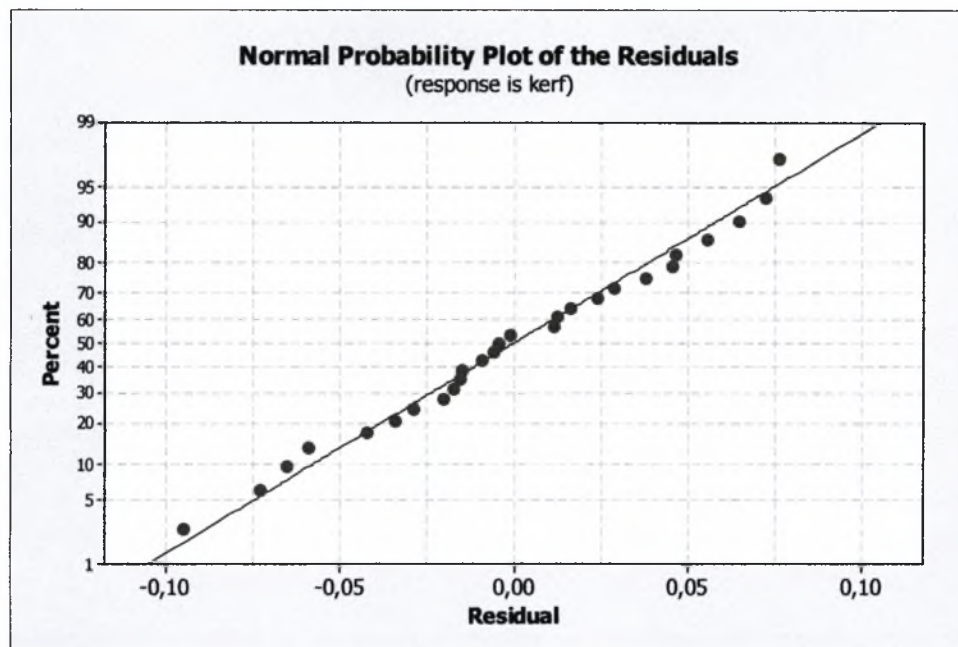
Πίνακας 7.4 Ανάλυση διακύμανσης του στοχαστικού μοντέλου για το μέσο εύρος αρμού (*kerf*) κοπής χάλυβα TRIP 700 HR-FH

7.3 Γραφήματα Καταλοίπων

Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο μέσω των γραφημάτων των καταλοίπων θα γίνει ο έλεγχος των υποθέσεων του μοντέλου. Δηλαδή, θα ελεγχθεί αν πληρούνται οι απαραίτητες προϋποθέσεις, έτσι ώστε να καταστεί δυνατό να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο για στατιστική συμπερασματολογία.

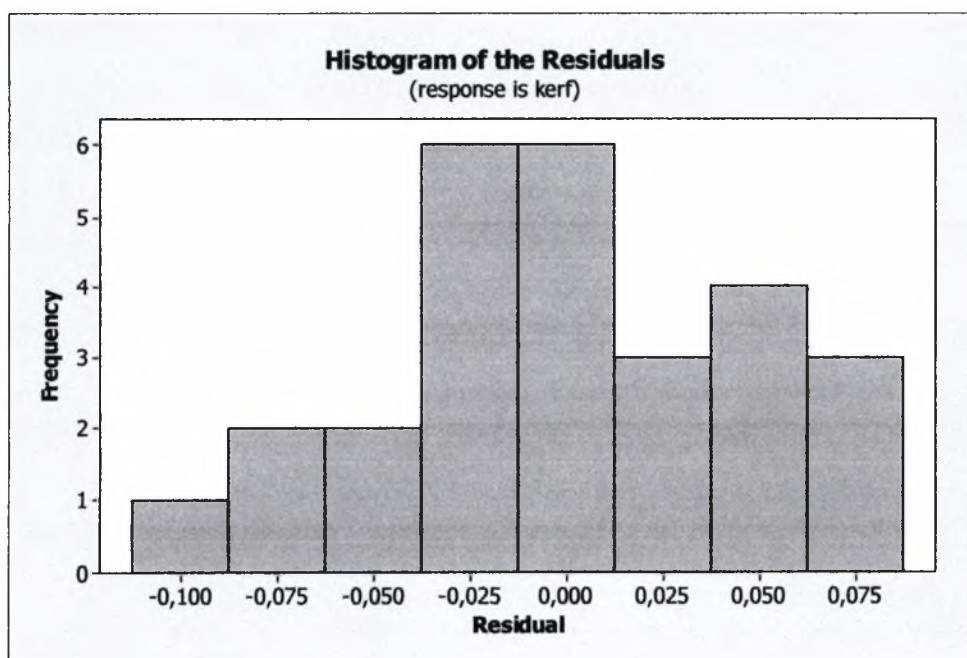
- Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας

Από το διάγραμμα έλεγχου κανονικότητας, θα εξετάσουμε αν τα κατάλοιπα του μοντέλου ακολουθούν την κανονική κατανομή



Εικόνα 7.1 Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας των κατάλοιπων για το *kerf* χάλυβα TRIP 700 HR-FH

Όπως με σαφήνεια μπορεί να φανεί και στο διάγραμμα, τα κατάλοιπα κινούνται πολύ κοντά στην κανονική κατανομή. Με δεδομένο αυτό μπορούμε με ασφάλεια να υποθέσουμε ότι τα κατάλοιπα ακολουθούν την κανονική κατανομή. Αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί και από το ιστόγραμμα των υπολοίπων (*Histogram of the Residuals*).

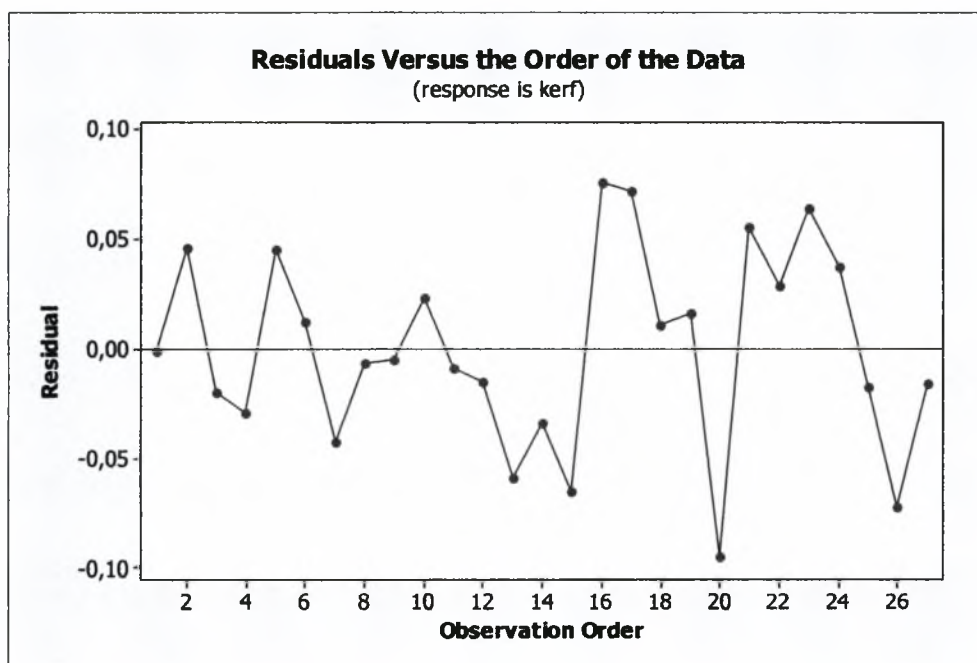


Εικόνα 7.2 Ιστόγραμμα των υπολοίπων για το *kerf* χάλυβα TRIP 700 HR-FH

Πράγματι, όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει και στο ιστόγραμμα, η μεγαλύτερη συχνότητα υπολοίπων από την κανονική κατανομή κυμαίνεται από -0.025 έως 0.025 και υπάρχει σχετικά ομοιόμορφη κατανομή υπολοίπων, γεγονός που ενισχύει την πιστότητα της υπόθεσης ότι τα κατάλοιπα ακολουθούν την κανονική κατανομή.

- Διάγραμμα υπολοίπων σε σχέση σειρά παρατήρησης (*Residuals Versus the Order of the Data*).

Από το διάγραμμα καταλοίπων ως προς την σειρά παρατηρήσεων θα εξετάσουμε την σταθερότητα διακύμανσης των αποτελεσμάτων.

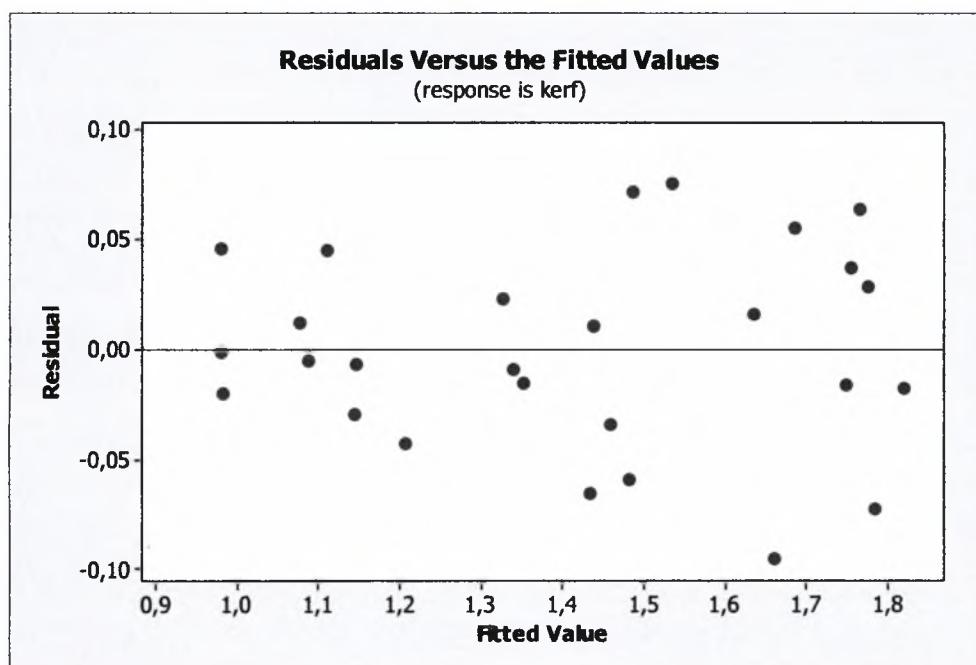


Εικόνα 7.3 Διάγραμμα υπολοίπων σε σχέση με τη σειρά παρατήρησης για *kerf* χάλυβα χάλυβα TRIP 700 HR-FH

Διακρίνουμε ότι το διάγραμμα είναι αρκετά ικανοποιητικό. Γενικά, έχουμε αρκετές αποκλίσεις, όμως το εύρος τους είναι αρκετά μικρό. Η μία αρκετά μεγάλη απόκλιση (η 20) δεν μπορεί να επηρεάσει την σταθερότητα διακύμανσης των αποτελεσμάτων.

- Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμώμενες τιμές (*Residuals Versus the Fitted Values*).

Από το διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμώμενες τιμές θα εξετάσουμε αν τα κατάλοιπα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Επίσης, μπορούμε να ανιχνεύσουμε και πιθανές ασυνήθιστες παρατηρήσεις.



Εικόνα 7.4 Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμώμενες τιμές για *kerf* χάλυβα χάλυβα TRIP 700 HR-FH

Από το διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα κατάλοιπα δεν ακολουθούν κάποιο πρότυπο (σχέση), δηλαδή κατανέμονται τυχαία πάνω και κάτω από το 0, γεγονός που μας οδηγεί ασφαλώς στο συμπέρασμα ότι τα κατάλοιπα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους

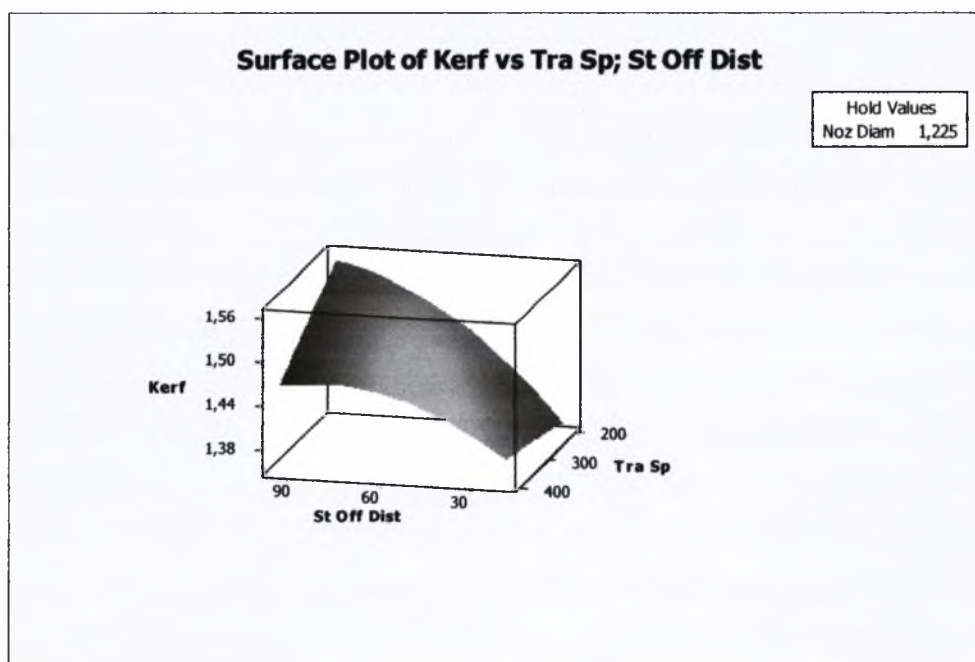
Αφού εξετάσαμε όλα τα διαγράμματα καταλοίπων και εξασφαλίσαμε ότι πληρούνται οι αναγκαίες προϋποθέσεις, είμαστε πλέον έτοιμοι να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο που αναπτύξαμε για στατιστική συμπερασματολογία.

7.4 Επιφάνειες προσαρμογής

Με τις επιφάνειες προσαρμογής, θα εξετάσουμε γραφικά τη συμπεριφορά της εξαρτημένης μεταβλητής, του μέσου εύρους (*kerf*) για κάθε συνδυασμό ανά δύο των παραγόντων, με βάση το στοχαστικό μοντέλο που έχει καταρτιστεί. Οι παράγοντες που δεν συμπεριλαμβάνονται κάθε φορά στο διάγραμμα, κρατούνται σταθεροί σε ένα επίπεδο.

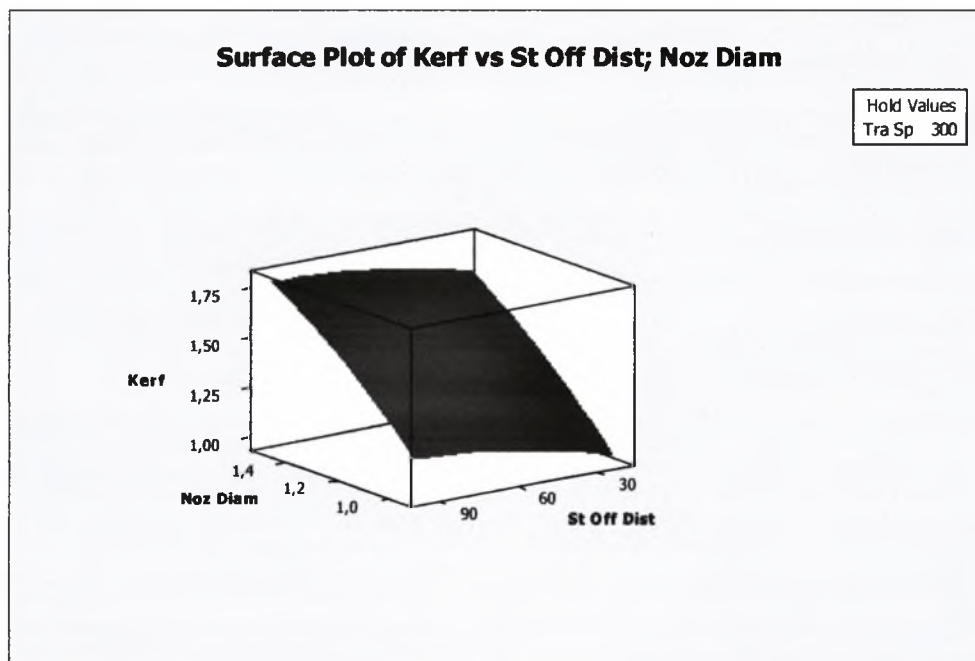
Οι επιφάνειες προσαρμογής του στοχαστικού μοντέλου του μέσου εύρους είναι οι ακόλουθες:

- Στο πρώτο διάγραμμα θα δούμε την συμπεριφορά του μέσου εύρους σε σχέση με την ταχύτητα και την απόσταση κοπής, ενώ η διάμετρος του ακροφυσίου έχει κρατηθεί σταθερή στην τιμή 1,225mm. Μπούμε να παρατηρήσουμε ότι η αύξηση της ταχύτητας κοπής και η αύξηση της απόστασης έχουν θετική επίδραση στο μέσο εύρος. Όμως, όπως είναι ευδιάκριτο, η αύξηση της ταχύτητας κοπής έχει πολύ μικρότερη επίδραση. Επίσης αξιοσημείωτο είναι ότι η επίδραση της αύξησης της απόστασης κοπής μειώνεται καθώς αυξάνει η τιμή της.



Εικόνα 7.5 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνισης της εξαρτημένης μεταβλητής *kerf* και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Trav. Sp.* και *St Off Dist* χάλυβα TRIP 700 HR-FH

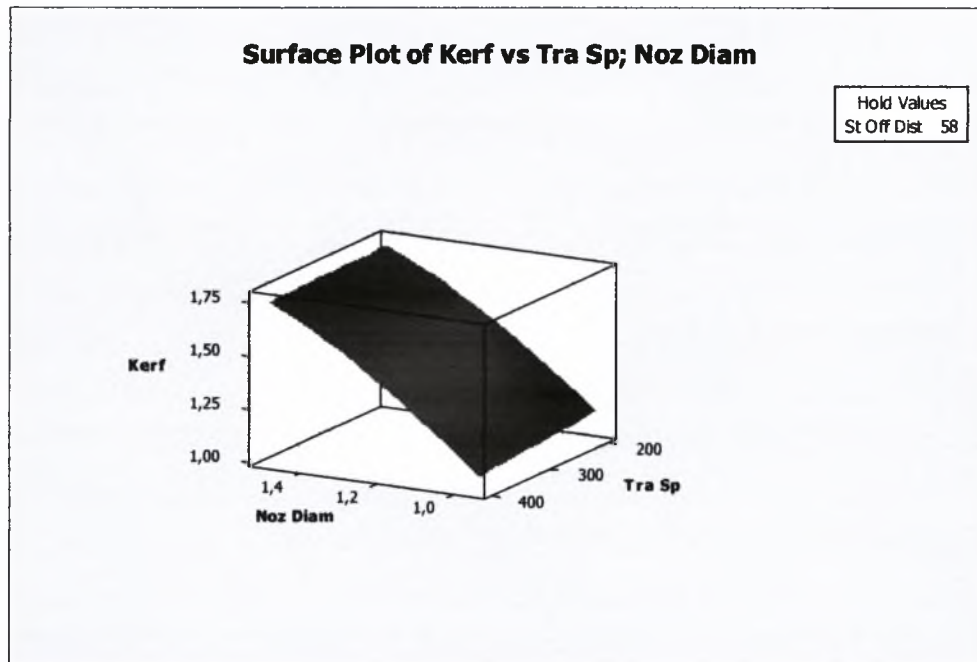
- Στο επόμενο διάγραμμα θα δούμε την συμπεριφορά του μέσου εύρους σε σχέση με την απόσταση κοπής και την διάμετρο του ακροφυσίου, ενώ η ταχύτητα κοπής έχει κρατηθεί σταθερή στην τιμή (300mm/min). Μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η αύξηση της διαμέτρου του ακροφυσίου και η αύξηση της απόστασης κοπής έχουν θετική επίδραση στο μέσο εύρος. Όμως όπως είναι ευδιάκριτο, η αύξηση της απόστασης κοπής έχει πολύ μικρότερη επίδραση.



Εικόνα 7.6 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνισης της εξαρτημένης μεταβλητής *kerf* και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Noz Diam.* και *St Off Dist.* σε χάλυβα TRIP 700 HR-FH

- Στο επόμενο διάγραμμα θα παρατηρήσουμε την συμπεριφορά του μέσου εύρους σε σχέση με την ταχύτητα κοπής και την διάμετρο του ακροφυσίου, ενώ η απόσταση κοπής έχει κρατηθεί σταθερή στην τιμή 58(mm). Μπούμε να διαπιστώσουμε ότι η αύξηση της διαμέτρου του ακροφυσίου και η αύξηση της ταχύτητας κοπής έχουν θετική επίδραση στο μέσο εύρος. Όμως, όπως είναι

ευδιάκριτο η αύξηση της απόστασης κοπής έχει πολύ μικρότερη επίδραση. Επίσης αξιοσημείωτο είναι, ότι η επίδραση της διαμέτρου του ακροφύσιου μειώνεται καθώς αυξάνει η τιμή της



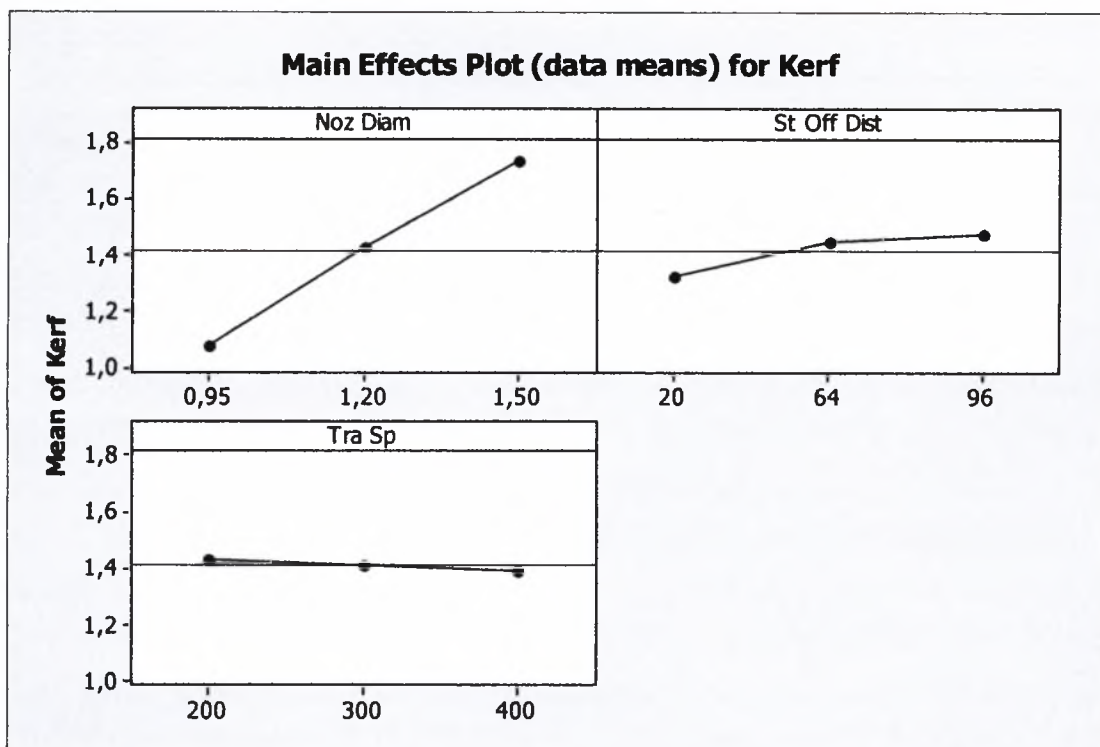
Εικόνα 7.7 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνιση της εξαρτημένης μεταβλητής *kerf* και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Noz Diam.* και *Trav. sp.* σε χάλυβα *TRIP 800 HR-FH*

7.5 Διαγράμματα κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων

Θα ολοκληρώσουμε την στατιστική ανάλυση μας με την παρουσίαση και ερμηνεία των διαγραμμάτων κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων

- Κύριες επιδράσεις παραγόντων

Οι κυρίες επιδράσεις κάθε παράγοντα θα παρουσιαστούν στο παρακάτω διάγραμμα, όπου σε κάθε επίπεδο τού κάθε παράγοντα έχουμε αντιστοιχίσει τον μέσο των παρατηρήσεων στο αντίστοιχο επίπεδο.



Εικόνα 7.8 Διάγραμμα κύριων επιδράσεων κάθε παράγοντα για το *kerf* χάλυβα *TRIP 800 HR-FH*

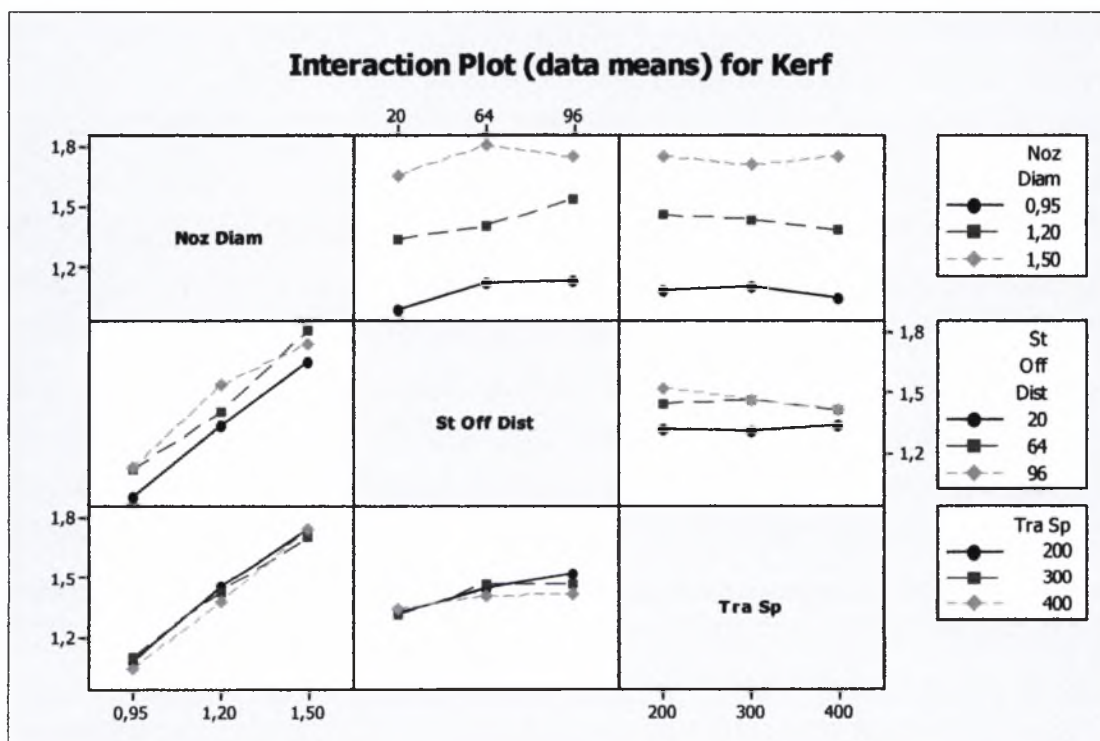
Από το διάγραμμα μπορεί κανείς εύκολα να διαπιστώσει ότι οι κύριες επιδράσεις των δύο πρώτων παραγόντων επιφέρουν θετική επίδραση στις τιμές του μέσου εύρους, καθώς μεταφερόμαστε σε υψηλότερα επίπεδα. Η επίδραση όμως της αύξησης της διαμέτρου του ακροφυσίου είναι αρκετά πιο σημαντική από την αύξηση της απόστασης κοπής. Αντίθετα με τους δύο πρώτους παράγοντες, ο τρίτος έχει αρνητική επίδραση στις τιμές του μέσου εύρους, καθώς μεταφερόμαστε σε υψηλότερα επίπεδα. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι έχει την ασθενέστερη επίδραση εκ των τριών παραγόντων. Όπως και για τον χάλυβα *TRIP 800 HR-FH* αν παρατηρήσει προσεκτικά κανείς τα διαγράμματα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνισης σε συνδυασμό με το διάγραμμα κύριων επιδράσεων θα διαπιστώσει μια αντίφαση. Στα μεν διαγράμματα τρισδιάστατης απεικόνισης η αύξηση της ταχύτητα κοπής έχει θετική επίδραση στο μέσο εύρος στο διάγραμμα κύριων επιδράσεων η επίδραση της ταχύτητα κοπής έχει αρνητική επίδραση. Η αντίφαση αυτή έγκειται στο γεγονός ότι

στα διαγράμματα τρισδιάστατης απεικόνισης λαμβάνονται υπόψιν και οι αλληλεπιδράσεις των παραγόντων που θα παρουσιαστούν παρακάτω.

- Αλληλεπιδράσεις παραγόντων

Από τα διαγράμματα των αλληλεπιδράσεων των παραγόντων, θα εξετάσουμε κατά πόσον οι κύριες επιδράσεις ενός παράγοντα είναι ίδιες σε όλα τα επίπεδα του άλλου παράγοντα. Αν αυτές είναι ίδιες, τότε αναφερόμαστε σε μη ύπαρξη αλληλεπίδρασης.

Στα διαγράμματα των αλληλεπιδράσεων έχουμε στον x-άξονα τα επίπεδα των παραγόντων και στον y-άξονα τις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής. Αν οι ευθείες των παραγόντων είναι σχεδόν παράλληλες, τότε μάλλον δεν έχουμε πρόβλημα αλληλεπίδρασης, ενώ αν οι ευθείες τέμνονται, τότε είναι σχεδόν βέβαιο ότι οι παράγοντες αλληλεπιδρούν.



Εικόνα 7.9 Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων κάθε παράγοντα για το *kerf* χάλυβα *TRIP 800* HR-FH

Για την διάμετρο του ακροφυσίου δεν εμφανίζεται διασταύρωση των γραμμών, όμως οι ευθείες των παραγόντων δεν είναι παράλληλες. Συμπεραίνουμε έτσι ότι οι παράγοντες αλληλεπιδρούν, αλλά χωρίς υψηλή στατιστική σημαντικότητα.

Για την απόσταση και την ταχύτητα κοπής υπάρχει διασταύρωση των γραμμών, γεγονός που σημαίνει ότι οι παράγοντες αλληλεπιδρούν με υψηλή στατιστική σημαντικότητα.

Εν κατακλείδι, μπορούμε να διαπιστώσουμε, ότι τα συμπεράσματα από την γραφική ανάλυση, συμβαδίζουν με τα συμπεράσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης και διακύμανσης, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία του καταρτισθέντος στοχαστικού μοντέλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΧΑΛΥΒΑ TRIP 800 HR-FH

8.1 Κατάρτιση στοχαστικού μοντέλου

Όπως και στην κατάρτιση στοχαστικού μοντέλου για το μέσο εύρος αρμού για να αρχίσει η ανάλυση παλινδρόμησης, επιλέξαμε ως αρχικό, το πλήρες πολυωνυμικό μοντέλο δευτέρου βαθμού:

$$Y_i = C_0 + C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + C_{12}X_1X_2 + C_{13}X_1X_3 + C_{23}X_2X_3 + C_{11}X_1^2 + C_{22}X_2^2 + C_{33}X_3^2$$

Με βάση την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων το πρόγραμμα προσπαθεί να εκτιμήσει τις παραμέτρους C_i και μας δίνει τον παρακάτω πίνακα :

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-5,921	1,844	-3,21	0,005
Noz Diam	16,366	2,592	6,31	0,000
St Off Dist	0,024562	0,009830	2,50	0,023
Tra Sp	0,005347	0,005242	1,02	0,322
Noz Diam*St Off Dist	0,003731	0,005128	0,73	0,477
Noz Diam*Tra Sp	-0,007564	0,001957	-3,87	0,001
St Off Dist*Tra Sp	-0,000003	0,000014	-0,24	0,817
Noz Diam*Noz Diam	-5,441	1,017	-5,35	0,000
St Off Dist*St Off Dist	-0,000138	0,000054	-2,53	0,021
Tra Sp*Tra Sp	0,000008	0,000008	1,09	0,289

S = 0,186658 R-Sq = 92,41% R-Sq(adj) = 88,39%

Πίνακας 8.1 Ανάλυση παλινδρόμησης του πλήρες πολυωνυμικό μοντέλου για την τραχύτητα του χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Από την ανάλυση παλινδρόμησης παρατηρούμε ότι, η *P-value* του όρου *St Off Dist*Tra Sp* είναι αρκετά υψηλή (0.817), ώστε να μπορεί να διαγραφεί. Αυτό σημαίνει ότι το γινόμενο της ταχύτητας του ακροφύσιου με την ταχύτητα κοπής

φαίνεται να έχει πολύ μικρή επιρροή στην τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας. Στην προσπάθειά μας να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο που να εξηγεί καλύτερα την διακύμανση των παρατηρήσεων της εξαρτημένης μεταβλητής επαναπροσδιορίζουμε το μοντέλο συνεχώς, διαγράφοντας σταδιακά όλους* τους όρους του μοντέλου που έχουν $P\text{-value} \geq 0,05$. Έτσι, καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα :

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-6,829	1,620	-4,22	0,000
Noz Diam	16,590	2,494	6,65	0,000
St Off Dist	0,028106	0,006110	4,60	0,000
Tra Sp	0,010147	0,002346	4,33	0,000
Noz Diam*Tra Sp	-0,007564	0,001896	-3,99	0,001
Noz Diam*Noz Diam	-5,4411	0,9859	-5,52	0,000
St Off Dist*St Off Dist	-0,000138	0,000053	-2,61	0,017

S = 0,180878 R-Sq = 91,62% R-Sq(adj) = 89,10%

Πίνακας 8.2 Ανάλυση παλινδρόμησης του προσαρμοσμένου πολυωνυμικού μοντέλου για την τραχύτητα του χάλυβα TRIP 800 HR-FH

8.2 Επιλογή στοχαστικού μοντέλου

Όπως έχει αναφερθεί, οι έλεγχοι $P\text{-value}$ έχουν σαν στόχο να μας οδηγήσουν σε βελτιώσεις στο μοντέλο μας, αυτό όμως δεν συνεπάγεται ότι μετά το πέρας του ελέγχου αυτού θα έχουμε καταλήξει και στο καταλληλότερο και γενικότερο μοντέλο. Η επιλογή του μοντέλου γίνεται με βάση την τιμή του τροποποιημένου συντελεστή προσδιορισμού $R - Sq (Adj)$. Βάσει αυτού του κριτηρίου οι εκτιμήσεις των συντελεστών του μοντέλου παλινδρόμησης δίνονται από τον πίνακα 8.2

* Κατά τον επαναπροσδιορισμό του μοντέλου εξακολουθεί να ισχύει ότι μπορούν να διαγραφούν όλοι οι όροι εκτός από τις ερμηνευτικές μεταβλητές *Nozzle Diameter, Stand of Distance, Travel Speed*. Και αυτό γιατί αποτελούν τους κύριους παράγοντες την επίδραση των οποίων θέλουμε να αναλύσουμε.

Ο οποίος μας οδηγεί στο στοχαστικό μοντέλο:

$$Y_{2 \text{ (TRIP 800)}} = -6,829 + 16,590 X_1 + 0,028106X_2 + 0,010147X_3 - 0,007564 X_1X_3 - 0,000008X_1^2$$

Από τις ελεγχουσυναρτήσεις T παρατηρούμε ότι στατιστικά σημαντικότεροι παράγοντες είναι: η διάμετρος (*Noz. Diam.*), ενώ ακολουθεί με μικρή διαφορά η ταχύτητα του ακροφυσίου (*Trav. Sp.*) και η απόσταση κοπής (*St. Of Dis*). Πρέπει να δοθεί έμφαση, επίσης στην υψηλή σημαντικότητα που παρουσιάζει ο παράγοντας *Noz Diam*Noz Diam* έναντι του παράγοντα της απόσταση κοπής (*St. Of Dis*) και της ταχύτητα του ακροφυσίου (*Trav. Sp.*).

Από τον πίνακα παλινδρόμησης βλέπουμε ότι ο συντελεστής προσδιορισμού *R-Sq* και ο τροποποιημένος συντελεστής προσδιορισμού *R-Sq(adj)* είναι αρκετά υψηλοί 91,62% και 89,10% αντίστοιχα, πράγμα που φανερώνει ότι το μοντέλο έχει πολύ καλή προσαρμογή.

Η ανάλυση διακύμανσης για το τελικό μοντέλο είναι η ακόλουθη :

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Noz Diam	1	1,2700	1,4856	1,4856	40,62	0,000
St Off Dist	1	4,0203	0,6479	0,6479	17,72	0,000
Tra Sp	1	0,1606	0,6121	0,6121	16,74	0,001
Noz Diam*Noz Diam	1	1,0263	1,0263	1,0263	28,06	0,000
St Off Dist*St Off Dist	1	0,1987	0,1987	0,1987	5,43	0,030
Noz Diam*Tra Sp	1	0,5207	0,5207	0,5207	14,24	0,001
Error	20	0,7314	0,7314	0,0366		
Total	26	7,9280				

Πίνακας 8.3 Ανάλυση διακύμανσης του στοχαστικού μοντέλου για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 800 HR-FH

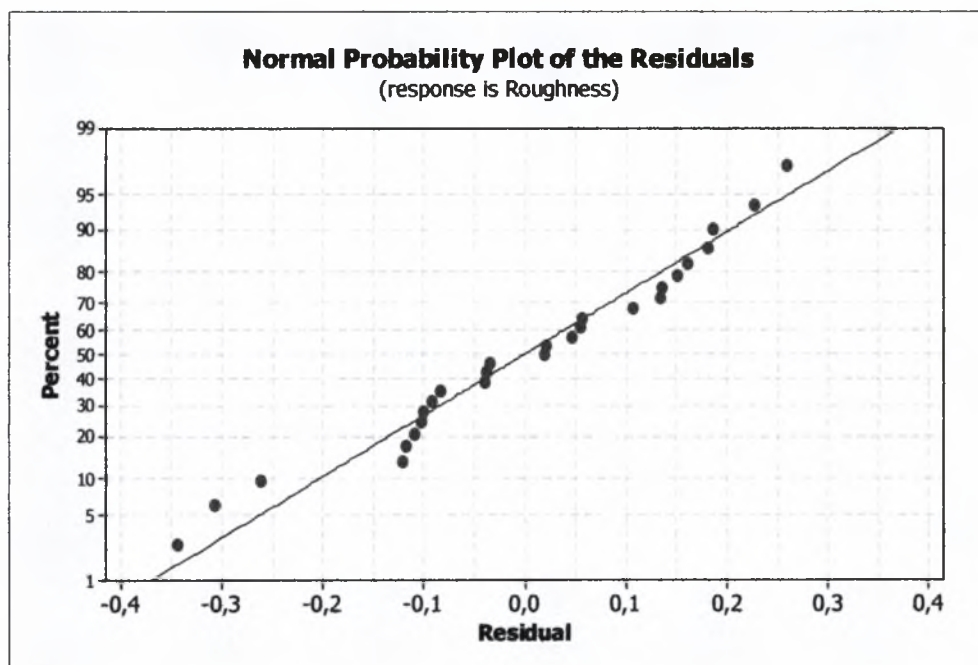
8.3 Γραφήματα Καταλοίπων

Όπως και στα προηγούμενα κεφάλαια που παρουσιάσαμε την στοχαστική μοντελοποίηση του μέσου εύρους, μέσω των γραφημάτων των καταλοίπων θα γίνει ο έλεγχος των υποθέσεων του μοντέλου. Δηλαδή, θα ελεγχθεί αν πληρούνται οι

απαραίτητες προϋποθέσεις, έτσι ώστε να καταστεί δυνατό να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο για στατιστική συμπερασματολογία.

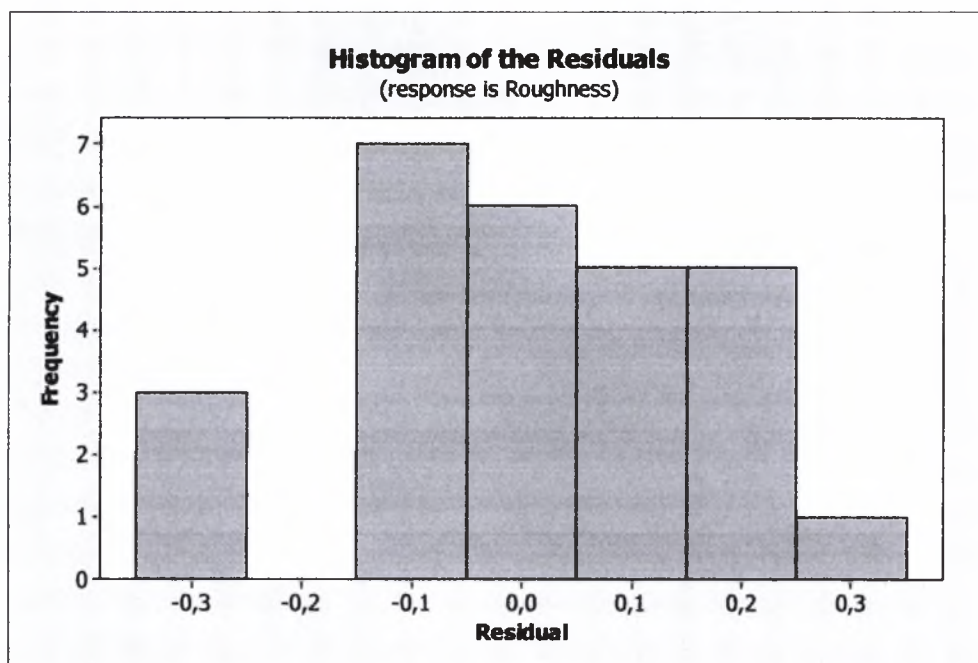
- Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας

Από το διάγραμμα έλεγχου κανονικότητας, θα εξετάσουμε αν τα κατάλοιπα του μοντέλου ακολουθούν την κανονική κατανομή



Εικόνα 8.1 Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας των καταλοίπων για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Όπως με σαφήνεια μπορεί να φανεί και στο διάγραμμα, τα υπόλοιπα κινούνται πολύ κοντά στην κανονική κατανομή. Με δεδομένο αυτό μπορούμε με ασφάλεια να υποθέσουμε ότι τα κατάλοιπα ακολουθούν την κανονική κατανομή. Αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί και από το ιστόγραμμα των υπολοίπων (*Histogram of the Residuals*).

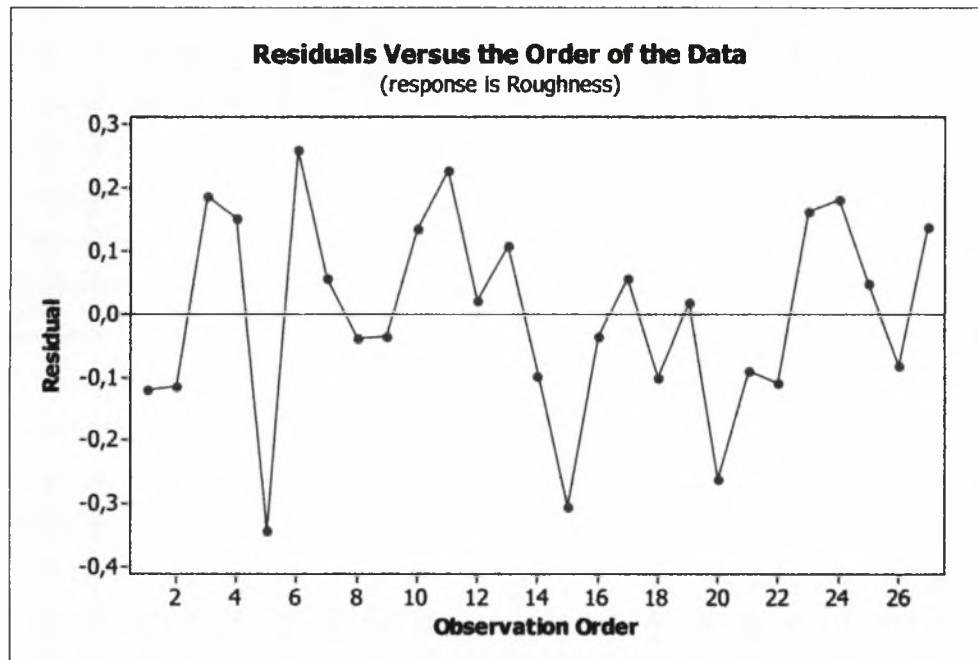


Εικόνα 8.2 Ιστόγραμμα των υπολοίπων για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Πράγματι, όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει και στο ιστόγραμμα τη μεγαλύτερη συχνότητα υπολοίπων από την κανονική κατανομή κυμαίνεται από -0.1 έως 0.1 και υπάρχει σχετικά ομοιόμορφη κατανομή υπολοίπων, πράγμα που ενισχύει την πιστότητα της υπόθεσης ότι τα κατάλοιπα ακολουθούν την κανονική κατανομή.

- Διάγραμμα υπολοίπων σε σχέση σειρά παρατήρησης (*Residuals Versus the Order of the Data*).

Από το διάγραμμα καταλοίπων ως προς την σειρά παρατηρήσεων θα εξετάσουμε την σταθερότητα διακύμανσης των αποτελεσμάτων .

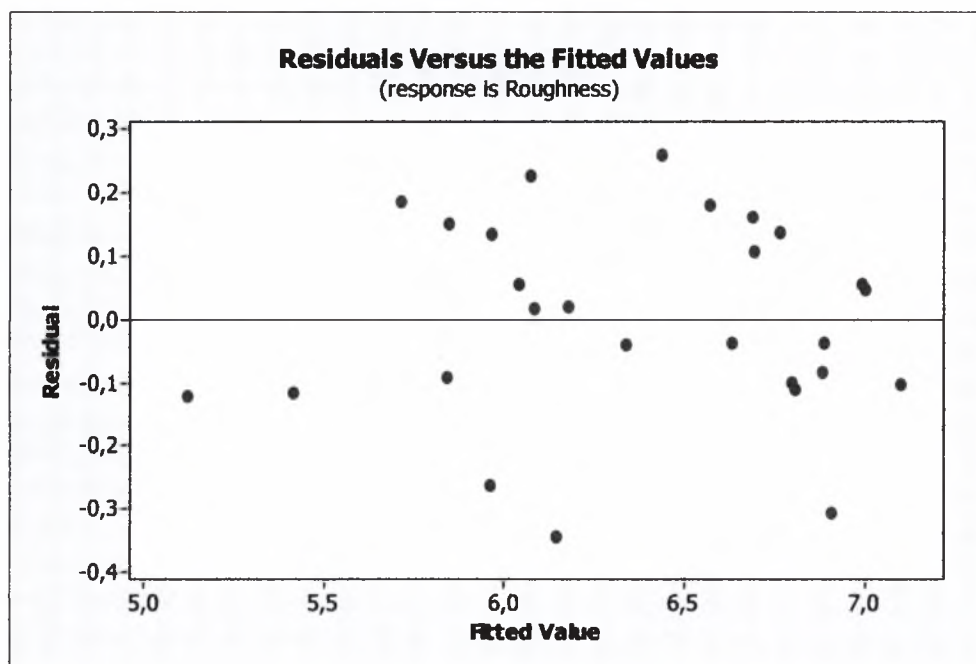


Εικόνα 8.3 Διάγραμμα υπολοίπων σε σχέση σειρά παρατήρησης για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Διακρίνουμε ότι το διάγραμμα είναι αρκετά ικανοποιητικό. Γενικά, έχουμε αρκετές αποκλίσεις, όμως το εύρος τους είναι αρκετά μικρό για να επηρεάσει την σταθερότητα διακύμανσης των αποτελεσμάτων. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις εντοπίζονται στις παρατηρήσεις 5, 15 .

- Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμώμενες τιμές (*Residuals Versus the Fitted Values*).

Από το διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμώμενες τιμές θα εξετάσουμε αν τα κατάλοιπα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Επίσης, μπορούμε να ανιχνεύσουμε και πιθανές ασυνήθιστες παρατηρήσεις.



Εικόνα 8.4 Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμώμενες τιμές για *kerf* χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Από το διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα κατάλοιπα δεν ακολουθούν κάποιο πρότυπο (σχέση), δηλαδή κατανέμονται τυχαία πάνω και κάτω από το 0, γεγονός που μας οδηγεί ασφαλώς στο συμπέρασμα ότι τα κατάλοιπα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους

Αφού εξετάσαμε όλα τα διαγράμματα κατάλοιπων και εξασφαλίσουμε ότι πληρούνται οι αναγκαίες προϋποθέσεις, είμαστε πλέον έτοιμοι να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο που αναπτύξαμε για στατιστική συμπερασματολογία.

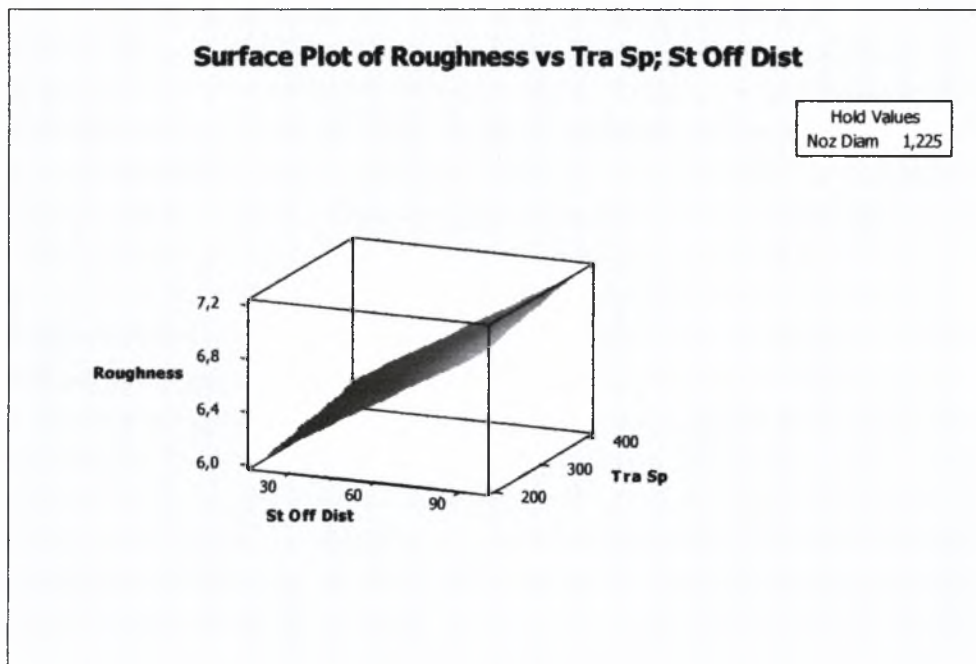
8.4 Επιφάνειες προσαρμογής

Με τις επιφάνειες προσαρμογής, θα εξετάσουμε γραφικά τη συμπεριφορά της εξαρτημένης μεταβλητής, για κάθε συνδυασμό ανά δύο των παραγόντων, με βάση το στοχαστικό μοντέλο που έχει καταρτιστεί. Οι παράγοντες που δεν

συμπεριλαμβάνονται κάθε φορά στο διάγραμμα, κρατούνται σταθεροί σε ένα επίπεδο.

Οι επιφάνειες προσαρμογής του στοχαστικού μοντέλου του μέσου εύρους είναι οι ακόλουθες:

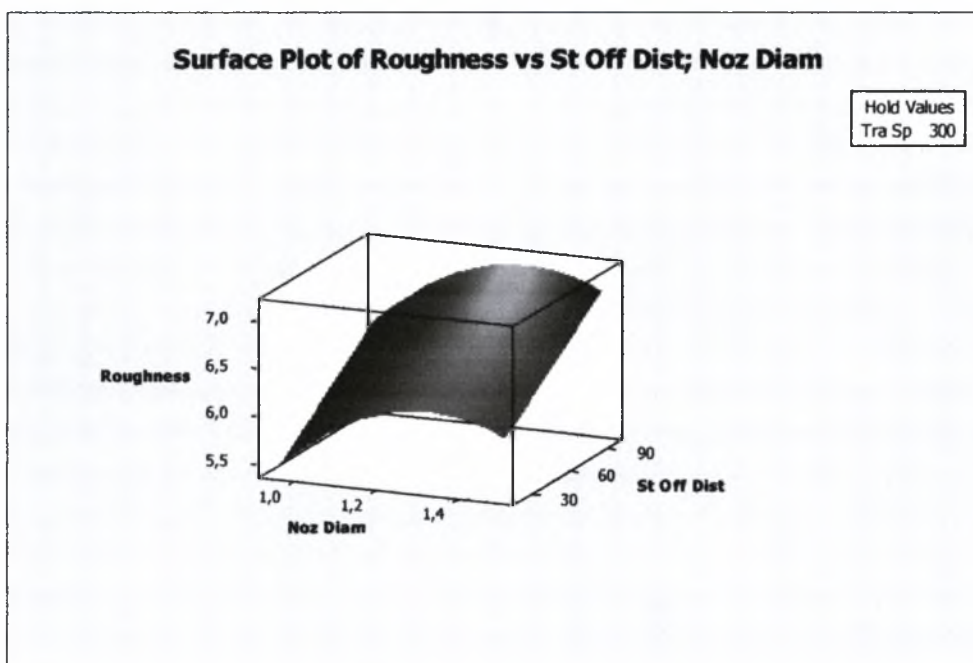
- Στο πρώτο διάγραμμα θα δούμε την συμπεριφορά της τραχύτητας σε σχέση με την ταχύτητα και την απόσταση κοπής ενώ η διάμετρος του ακροφυσίου έχει κρατηθεί σταθερή στην τιμή 1,225mm. Μπούμε να παρατηρήσουμε ότι η αύξηση της ταχύτητας κοπής και η αύξηση της απόστασης έχουν θετική επίδραση στην τραχύτητα. Όμως, όπως είναι ευδιάκριτο, η αύξηση της ταχύτητας κοπής έχει πολύ μικρότερη επίδραση.



Εικόνα 8.5 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνιση της εξαρτημένης μεταβλητής, δηλαδή της τραχύτητας και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Trav. Sp.* και *St Off Dist* σε χάλυβα TRIP 800 HR-FH

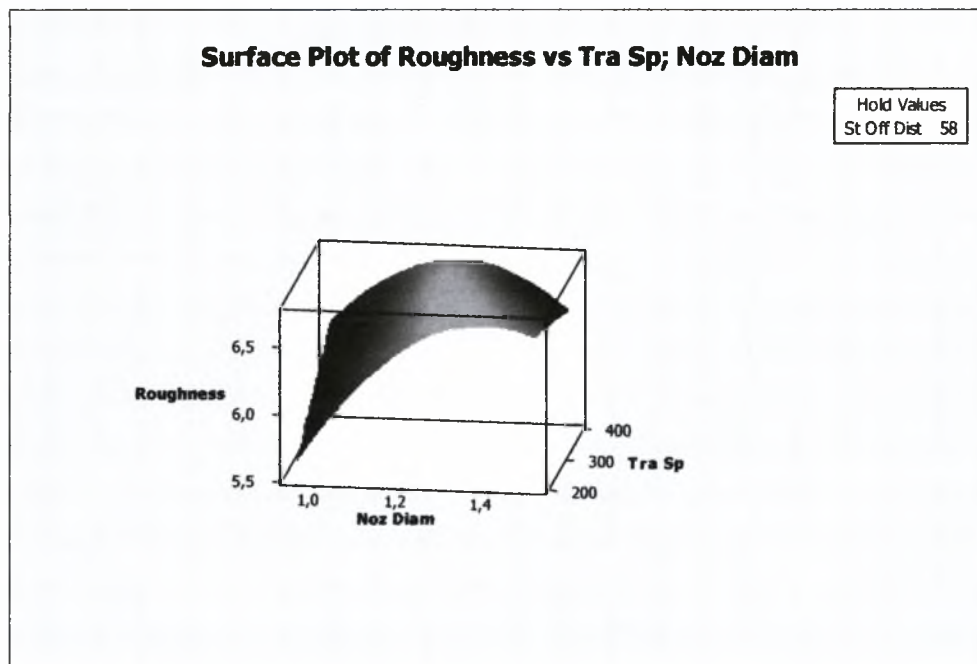
- Στο επόμενο διάγραμμα θα δούμε την συμπεριφορά του μέσου εύρους σε σχέση με την απόσταση κοπής και την διάμετρο του ακροφυσίου, ενώ η ταχύτητα κοπής έχει κρατηθεί σταθερή στην τιμή (300mm/min). Μπορούμε να

διαπιστώσουμε ότι η αύξηση της διαμέτρου του ακροφυσίου προκαλεί αρχικά αύξηση στην τραχύτητα, αν όμως συνεχίσουμε σταδιακά αυτή την αύξηση στην διάμετρο του ακροφυσίου θα έχουμε ακριβώς το αντίθετο αποτελέσματα, δηλαδή η τραχύτητα θα αρχίσει να μειώνεται. Αντίθετα, η απόσταση κοπής προκαλεί σταθερά θετική επίδραση στην τραχύτητα.



Εικόνα 8.6 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνισης της εξαρτημένης μεταβλητής, δηλαδή της τραχύτητας και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Noz Diam.* και *St Off Dist.* σε χάλυβα TRIP 800 HR-FH

- Στο επόμενο διάγραμμα θα παρατηρήσουμε την συμπεριφορά της τραχύτητας σε σχέση με την ταχύτητα κοπής και την διάμετρο του ακροφυσίου, ενώ η απόσταση κοπής έχει κρατηθεί σταθερή στην τιμή 58(mm). Όπως και στο προηγούμενο διάγραμμα, η αύξηση της διαμέτρου του ακροφυσίου προκαλεί αρχικά αύξηση στην τραχύτητα, αν όμως συνεχίσουμε σταδιακά αυτή την αύξηση στην διάμετρο του ακροφυσίου θα έχουμε ακριβώς το αντίθετο αποτελέσματα, δηλαδή η τραχύτητα θα αρχίσει να μειώνεται. Αντίθετα, η απόσταση κοπής προκαλεί σταθερά αρνητική επίδραση στην τραχύτητα.



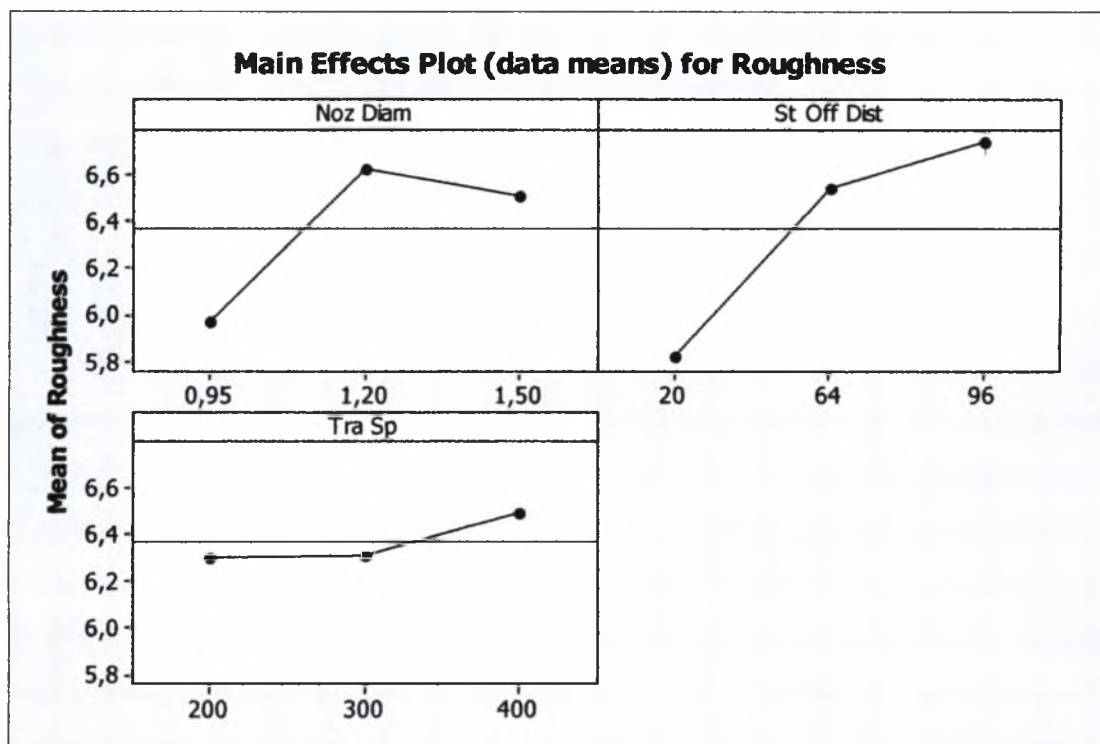
Εικόνα 8.7 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνιση της εξαρτημένης μεταβλητής, τραχύτητα, και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Noz Diam.* και *Tran. sp.* χάλυβα TRIP 800 HR-FH

8.5 Διαγράμματα κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων

Θα ολοκληρώσουμε την στατιστική ανάλυση μας με την παρουσίαση και ερμηνεία των διαγραμμάτων κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων

- **Κύριες επιδράσεις παραγόντων**

Οι κυρίες επιδράσεις κάθε παράγοντα θα παρουσιαστούν στο παρακάτω διάγραμμα, όπου σε κάθε επίπεδο τού κάθε παράγοντα έχουμε αντιστοιχίσει τον μέσο των παρατηρήσεων στο αντίστοιχο επίπεδο.



Εικόνα 8.8 Διάγραμμα κύριων επιδράσεων κάθε παράγοντα για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 800 HR-FH

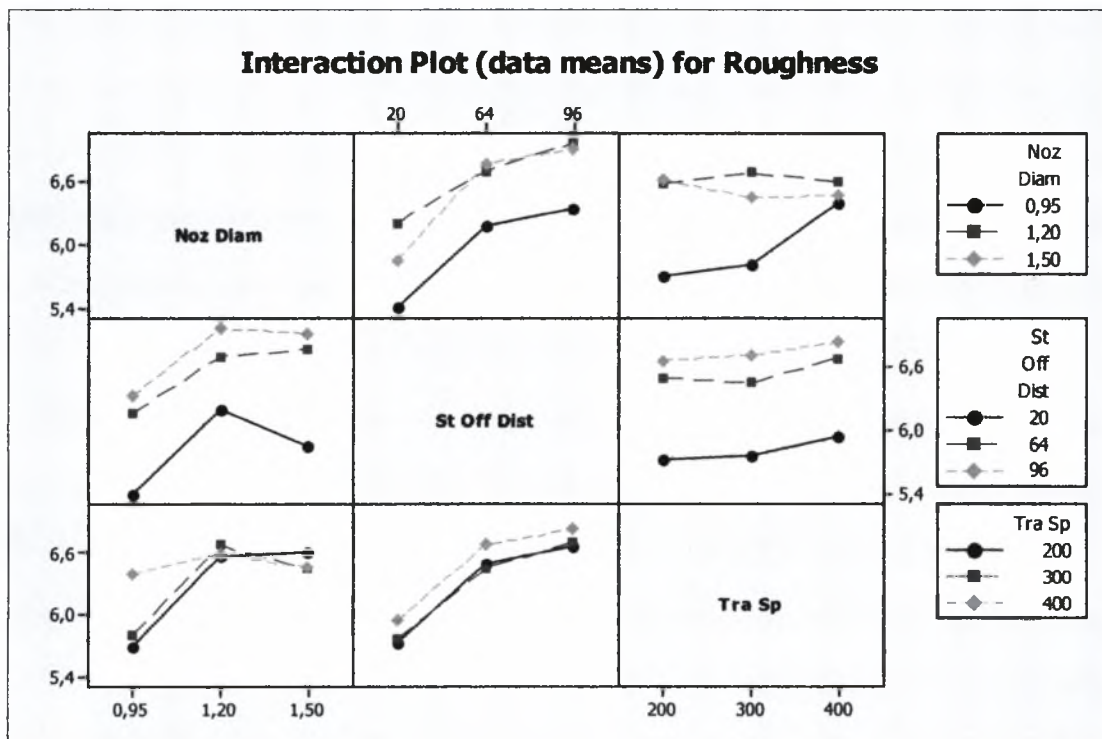
Στο παραπάνω διάγραμμα όπως και στα τρισδιάστατα διαγράμματα γραφικής απεικόνισης, είναι φανερό ότι η αύξηση της διαμέτρου του ακροφυσίου προκαλεί αρχικά αύξηση στην τραχύτητα, αν όμως συνεχίσουμε σταδιακά αυτή την αύξηση στην διάμετρο του ακροφυσίου θα έχουμε ακριβώς το αντίθετο αποτελέσματα, δηλαδή η τραχύτητα θα αρχίσει να μειώνεται. Η κύρια επίδραση της απόστασης κοπής επιφέρει θετική επίδραση στις τιμές της τραχύτητας, καθώς μεταφερόμαστε σε υψηλότερα επίπεδα όμως η ένταση της μειώνεται. Ενώ ο τρίτος παράγοντας, η ταχύτητα κοπής, έχει αρχικά μικρή θετική επίδραση στις τιμές της τραχύτητας, καθώς όμως μεταφερόμαστε σε υψηλότερα επίπεδα, η ένταση της κλιμακώνεται, αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι έχει την ασθενέστερη επίδραση εκ των τριών παραγόντων. Αν παρατήρησει προσεκτικά κανείς τα διαγράμματα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνιση σε συνδυασμό με το διάγραμμα κύριων επιδράσεων θα διαπίστωσει μια αντίφαση, στα μεν διαγράμματα τρισδιάστατης απεικόνισης η αύξηση της ταχύτητας κοπής έχει αρνητική επίδραση στην τραχύτητα, στο δε διάγραμμα κύριων επιδράσεων η επίδραση της είναι αρνητική. Η αντίφαση αυτή έγκειται στο γεγονός ότι στα

διαγράμματα τρισδιάστατης απεικόνισης λαμβάνονται υπόψιν και οι αλληλεπιδράσεις των παραγόντων που θα παρουσιαστούν παρακάτω.

- Αλληλεπιδράσεις παραγόντων

Από τα διαγράμματα των αλληλεπιδράσεων των παραγόντων, θα εξετάσουμε κατά πόσον οι κύριες επιδράσεις ενός παράγοντα είναι ίδιες σε όλα τα επίπεδα του άλλου παράγοντα. Αν αυτές είναι ίδιες, τότε αναφερόμαστε σε μη ύπαρξη αλληλεπίδρασης.

Στα διαγράμματα των αλληλεπιδράσεων έχουμε στον x-άξονα τα επίπεδα των παραγόντων και στον y-άξονα τις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής. Αν οι ευθείες των παραγόντων είναι σχεδόν παράλληλες, τότε μάλλον δεν έχουμε πρόβλημα αλληλεπίδρασης, ενώ αν οι ευθείες τέμνονται, τότε είναι σχεδόν βέβαιο ότι οι παράγοντες αλληλεπιδρούν.



Εικόνα 8.9 Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων κάθε παράγοντα για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Για την απόσταση κοπής δεν υπάρχει διασταύρωση γραμμών, όμως οι ευθείες των παραγόντων δεν είναι παράλληλες. Συμπεραίνουμε, έτσι, ότι οι παράγοντες αλληλεπιδρούν, αλλά χωρίς υψηλή στατιστική σημαντικότητα.

Για την διάμετρο του ακροφυσίου και την ταχύτητα κοπής υπάρχει διασταύρωση των γραμμών, γεγονός που σημαίνει ότι οι παράγοντες αλληλεπιδρούν με υψηλή στατιστική σημαντικότητα.

Εν κατακλείδι, μπορούμε να διαπιστώσουμε, ότι τα συμπεράσματα από την γραφική ανάλυση, συμβαδίζουν με τα συμπεράσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης και διακύμανσης, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία του στοχαστικού μοντέλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΧΑΛΥΒΑ TRIP 700 CR-FH

9.1 Κατάρτιση στοχαστικού μοντέλου

Όπως και για την κατάρτιση στοχαστικού μοντέλου για τον χάλυβα TRIP 700 HR-FH για να αρχίσει η ανάλυση παλινδρόμησης επιλέξαμε ως αρχικό το πλήρες πολυωνυμικό μοντέλο δευτέρου βαθμού:

$$Y_i = C_0 + C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + C_{12}X_1X_2 + C_{13}X_1X_3 + C_{23}X_2X_3 + C_{11}X_1^2 + C_{22}X_2^2 + C_{33}X_3^2$$

Με βάση την μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων το πρόγραμμα προσπαθεί να εκτιμήσει τις παραμέτρους C_i και μας δίνει τον παρακάτω πίνακα :

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-14,092	5,085	-2,77	0,013
Noz Diam	27,190	7,148	3,80	0,001
St Off Dist	0,04835	0,02711	1,78	0,092
Tra Sp	0,00032	0,01446	0,02	0,983
Noz Diam*Noz Diam	-8,983	2,805	-3,20	0,005
St Off Dist*St Off Dist	-0,000044	0,000150	-0,30	0,770
Tra Sp*Tra Sp	0,000007	0,000021	0,33	0,745
Noz Diam*St Off Dist	-0,01479	0,01414	-1,05	0,310
Noz Diam*Tra Sp	-0,001886	0,005395	-0,35	0,731
St Off Dist*Tra Sp	0,000005	0,000039	0,12	0,905

S = 0,514693 R-Sq = 90,12% R-Sq(adj) = 84,89%

Πίνακας 9.1 Ανάλυση παλινδρόμησης του πλήρους πολυωνυμικού μοντέλου για την τραχύτητα του χάλυβα TRIP 800 HR-FH

Από την ανάλυση παλινδρόμησης παρατηρούμε ότι, η *P-value* του όρου *St Off Dist*Tra Sp* είναι αρκετά υψηλή (0.917), ώστε να μπορεί να διαγραφεί. Αυτό σημαίνει ότι το γινόμενο της ταχύτητας του ακροφύσιου με την ταχύτητα κοπής

φαίνεται να έχει πολύ μικρή επιρροή στην τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας. Στην προσπάθειά μας να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο που να εξηγεί καλύτερα την διακύμανση των παρατηρήσεων της εξαρτημένης μεταβλητής επαναπροσδιορίζουμε το μοντέλο συνεχώς, διαγράφοντας σταδιακά όλους* τους όρους του μοντέλου που έχουν $P\text{-value} \geq 0,05$. Έτσι καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα :

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-11,788	3,508	-3,36	0,003
Noz Diam	23,921	5,837	4,10	0,000
St Off Dist	0,026007	0,002686	9,68	0,000
Tra Sp	0,002472	0,001025	2,41	0,025
Noz Diam*Noz Diam	-8,242	2,370	-3,48	0,002

S = 0,434755 R-Sq = 90,45% R-Sq(adj) = 88,72%

Πίνακας 9.2 Ανάλυση παλινδρόμησης του προσαρμοσμένου πολυωνυμικού μοντέλου για την τραχύτητα του χάλυβα TRIP 700 CR-FH

9.2 Επιλογή στοχαστικού μοντέλου

Όπως έχει αναφερθεί, οι έλεγχοι $P\text{-value}$ έχουν σαν στόχο να μας οδηγήσουν σε βελτιώσεις στο μοντέλο μας, αυτό όμως δεν συνεπάγεται ότι μετά το πέρας του ελέγχου αυτού θα έχουμε καταλήξει και στο καταλληλότερο και γενικότερο μοντέλο. Η επιλογή του μοντέλου γίνεται με βάση την τιμή του τροποποιημένου συντελεστή προσδιορισμού $R - Sq (Adj)$. Βάσει αυτού του κριτηρίου οι εκτιμήσεις των συντελεστών του μοντέλου παλινδρόμησης δίνονται από τον πίνακα 9.2

* Κατά τον επαναπροσδιορισμό του μοντέλου εξακολουθεί να ισχύει ότι μπορούν να διαγραφούν όλοι οι όροι εκτός από τις ερμηνευτικές μεταβλητές ,Nozzle Diameter, Stand of Distance, Travel Speed. Και αυτό γιατί αποτελούν τους κύριους παράγοντες την επίδραση των οποίων θέλουμε να αναλύσουμε.

Ο οποίος μας οδηγεί στο στοχαστικό μοντέλο:

$$Y_{2(\text{TRIP } 700)} = -11,788 \quad 23,921 X_1 + 0,026007 X_2 + 0,002472 X_3 - 8,242 X_1^2$$

Από τις ελεγχουσυναρτήσεις T παρατηρούμε ότι στατιστικά σημαντικότεροι παράγοντες είναι: η απόσταση κοπής (*St. Of Dis*), ενώ ακολουθεί με μικρή διαφορά η ταχύτητα του ακροφυσίου (*Trav. Sp.*) και η διάμετρος ακροφυσίου (*Noz. Diam.*). Πρέπει να δοθεί έμφαση επίσης, στην υψηλή σημαντικότητα που παρουσιάζει ο παράγοντας *Noz Diam*Noz Diam* έναντι του παράγοντα της απόσταση κοπής (*St. Of Dis*) και της διαμέτρου ακροφυσίου (*Noz. Diam.*).

Από τον πίνακα παλινδρόμησης βλέπουμε ότι ο συντελεστής προσδιορισμού $R-Sq$ και ο τροποποιημένος συντελεστής προσδιορισμού $R-Sq(adj)$ είναι αρκετά υψηλοί 90,45% και 88,72% αντίστοιχα, γεγονός που φανερώνει ότι το μοντέλο έχει πολύ καλή προσαρμογή.

Η ανάλυση διακύμανσης για το τελικό μοντέλο είναι η ακόλουθη :

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Noz Diam	1	18,2784	3,1742	3,1742	16,79	0,000
St Off Dist	1	17,7266	17,7266	17,7266	93,79	0,000
Tra Sp	1	1,1001	1,1001	1,1001	5,82	0,025
Noz Diam*Noz Diam	1	2,2866	2,2866	2,2866	12,10	0,002
Error	22	4,1583	4,1583	0,1890		
Total	26	43,5500				

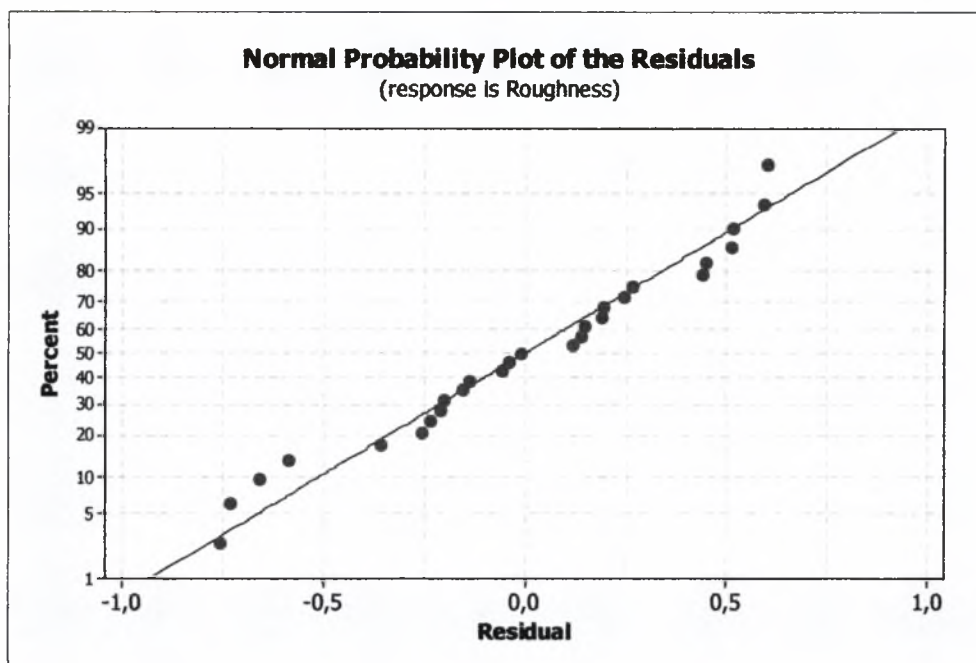
Πίνακας 9.3 Ανάλυση διακύμανσης του στοχαστικού μοντέλου για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 700 CR-FH

9.3 Γραφήματα Κατάλοιπων

Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο μέσω των γραφημάτων των καταλοίπων θα γίνει ο έλεγχος των υποθέσεων του μοντέλου. Δηλαδή, θα ελεγχθεί αν πληρούνται οι απαραίτητες προϋποθέσεις, έτσι ώστε να καταστεί δυνατό να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο για στατιστική συμπερασματολογία.

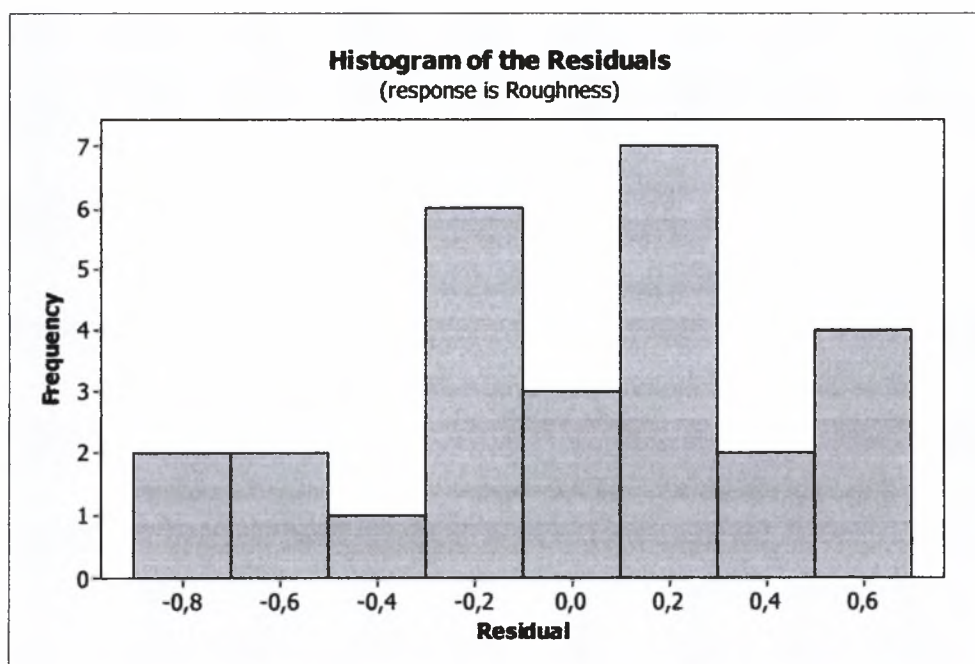
- Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας

Από το διάγραμμα έλεγχου κανονικότητας θα εξετάσουμε αν τα κατάλοιπα του μοντέλου ακολουθούν την κανονική κατανομή



Εικόνα 9.1 Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας των καταλοίπων για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 700 CR-FH

Όπως με σαφήνεια μπορεί να φανεί και στο διάγραμμα, τα κατάλοιπα κινούνται πολύ κοντά στην κανονική κατανομή. Με δεδομένο αυτό μπορούμε με ασφάλεια να υποθέσουμε ότι τα κατάλοιπα ακολουθούν την κανονική κατανομή. Αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί και από το ιστόγραμμα των υπολοίπων (*Histogram of the Residuals*).

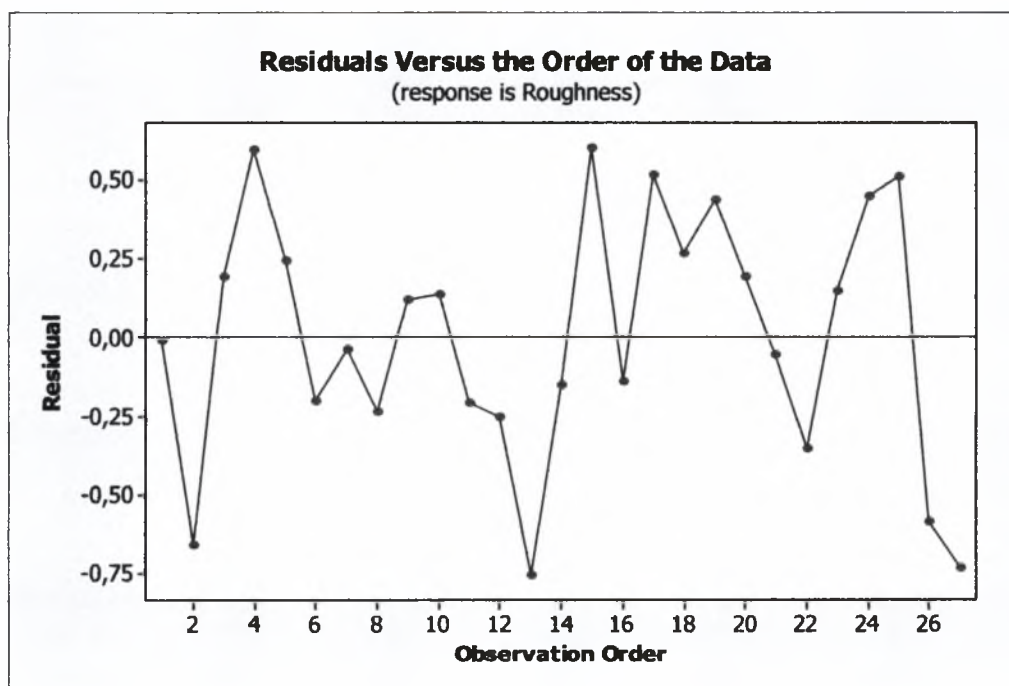


Εικόνα 9.2 Ιστόγραμμα των υπολοίπων για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 700 CR-FH

Πράγματι, όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει και στο ιστόγραμμα, τη μεγαλύτερη συχνότητα υπολοίπων από την κανονική κατανομή κυμαίνεται από -0.3 έως 0.3 και υπάρχει σχετικά ομοιόμορφη κατανομή υπολοίπων, πράγμα που ενισχύει την πιστότητα της υπόθεσης ότι τα κατάλοιπα ακολουθούν την κανονική κατανομή.

- Διάγραμμα υπολοίπων σε σχέση σειρά παρατήρησης (*Residuals Versus the Order of the Data*).

Από το διάγραμμα καταλοίπων ως προς την σειρά παρατηρήσεων θα εξετάσουμε την σταθερότητα διακύμανσης των αποτελεσμάτων.

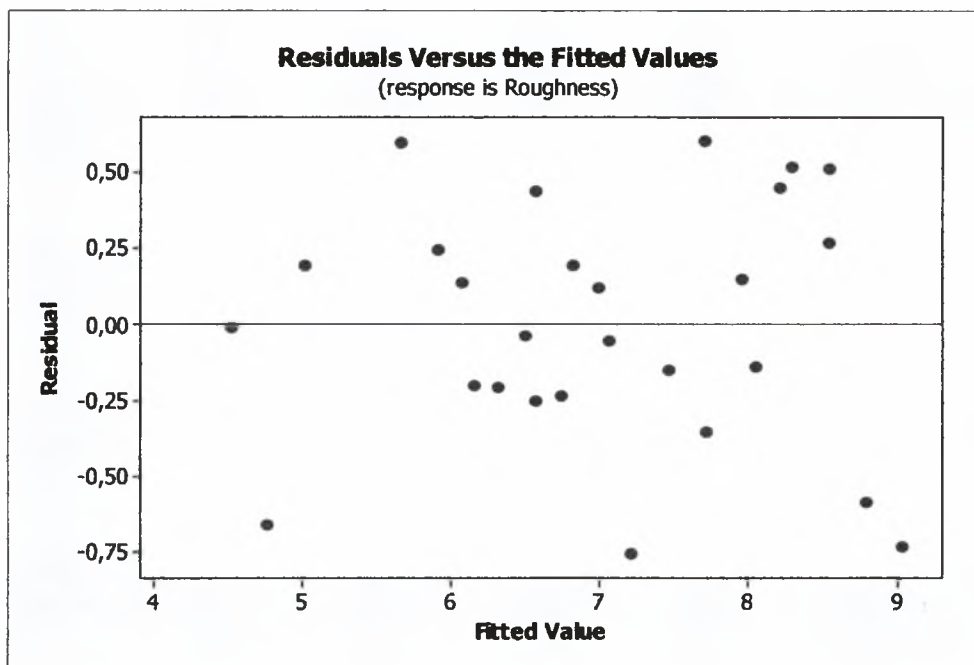


Εικόνα 9.3 Διάγραμμα υπολοίπων σε σχέση σειρά παρατήρησης για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 700 CR-FH

Διακρίνουμε ότι το διάγραμμα είναι αρκετά ικανοποιητικό. Γενικά, έχουμε αρκετές αποκλίσεις, όμως το εύρος τους είναι αρκετά μικρό για να επηρεάσει την σταθερότητα διακύμανσης των αποτελεσμάτων. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις εντοπίζονται στις παρατηρήσεις 2, 13, 27.

- Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμώμενες τιμές (*Residuals Versus the Fitted Values*).

Από το διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμώμενες τιμές θα εξετάσουμε αν τα κατάλοιπα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Επίσης, μπορούμε να ανιχνεύσουμε και πιθανές ασυνήθιστες παρατηρήσεις.



Εικόνα 9.4 Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμώμενες τιμές για *kerf* χάλυβα TRIP 700 CR-FH

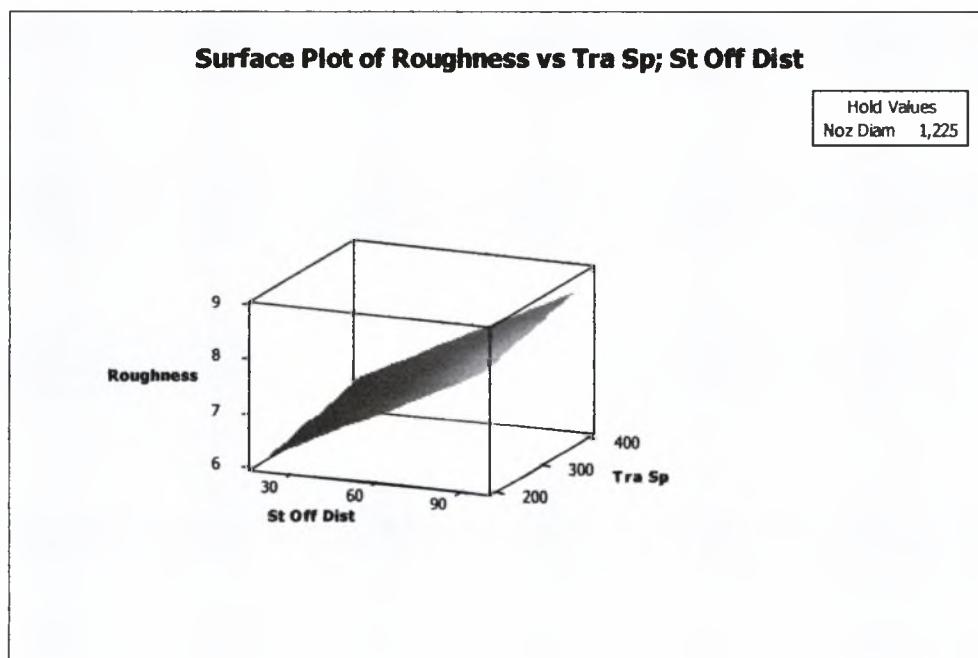
Από το διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα κατάλοιπα δεν ακολουθούν κάποιο πρότυπο (σχέση), δηλαδή κατανέμονται τυχαία πάνω και κάτω από το 0, γεγονός που μας οδηγεί ασφαλώς στο συμπέρασμα ότι τα κατάλοιπα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Αφού εξετάσαμε όλα τα διαγράμματα καταλοίπων και εξασφαλίσαμε ότι πληρούνται οι αναγκαίες προϋποθέσεις, είμαστε πλέον έτοιμοι να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο που αναπτύξαμε για στατιστική συμπερασματολογία.

9.4 Επιφάνειες προσαρμογής

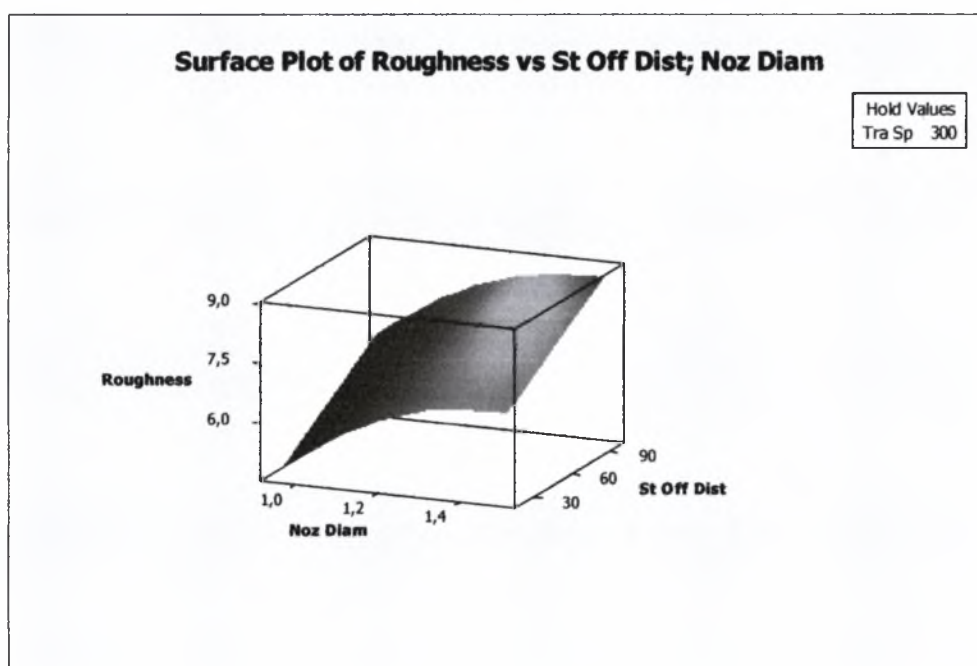
Με τις επιφάνειες προσαρμογής, θα εξετάσουμε γραφικά τη συμπεριφορά της εξαρτημένης μεταβλητής, για κάθε συνδυασμό ανά δύο των παραγόντων, με βάση το στοχαστικό μοντέλο που έχει αναπτυχθεί. Οι παράγοντες που δεν συμπεριλαμβάνονται κάθε φορά στο διάγραμμα κρατούνται σταθεροί σε ένα επίπεδο. Οι επιφάνειες προσαρμογής του στοχαστικού μοντέλου του μέσου εύρους είναι οι ακόλουθες:

- Στο πρώτο διάγραμμα θα δούμε την συμπεριφορά της τραχύτητας σε σχέση με την ταχύτητα και την απόσταση κοπής, ενώ η διάμετρος του ακροφυσίου έχει κρατηθεί σταθερή στην τιμή 1,225mm. Μπούμε να παρατηρήσουμε ότι η αύξηση της ταχύτητας κοπής και η αύξηση της απόστασης έχουν θετική επίδραση στην τραχύτητα. Όμως, όπως είναι ευδιάκριτο, η αύξηση της ταχύτητας κοπής έχει πολύ μικρότερη επίδραση.



Εικόνα 9.5 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνισης της εξαρτημένης μεταβλητής, δηλαδή της τραχύτητας, και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Trav. Sp.* και *St Off Dist* σε χάλυβα TRIP 700 CR-FH

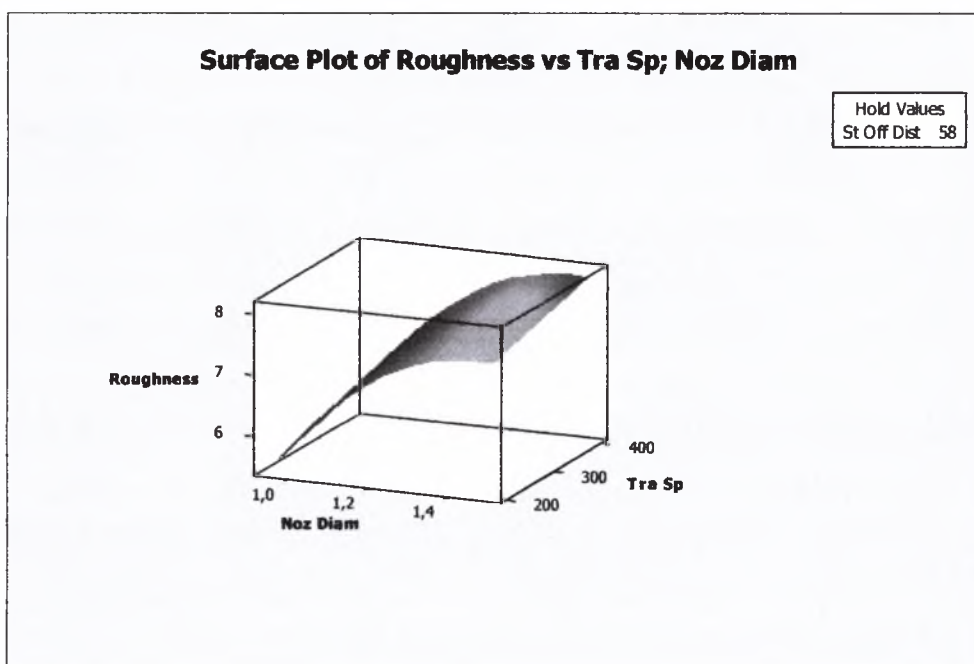
- Στο επόμενο διάγραμμα θα δούμε την συμπεριφορά του μέσου εύρους σε σχέση με την απόσταση κοπής και την διάμετρο του ακροφυσίου, ενώ η ταχύτητα κοπής έχει κρατηθεί σταθερή στην τιμή (300mm/min). Μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η αύξηση της διαμέτρου του ακροφυσίου προκαλεί αρχικά αύξηση στην τραχύτητα, αν όμως συνεχίσουμε σταδιακά αυτή την αύξηση στην διάμετρο του ακροφυσίου θα έχουμε ακριβώς το αντίθετο αποτέλεσμα, δηλαδή η τραχύτητα θα αρχίσει να μειώνεται. Αντίθετα, η απόσταση κοπής προκαλεί σταθερά θετική επίδραση στην τραχύτητα.



Εικόνα 9.6 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνισης της εξαρτημένης μεταβλητής, δηλαδή της τραχύτητας, και των ανεξάρτητων *Noz Diam.* και *St Off Dist.* σε χάλυβα TRIP 700 CR-FH

- Στο επόμενο διάγραμμα θα ελέγξουμε την συμπεριφορά της τραχύτητας σε σχέση με την ταχύτητα κοπής και την διάμετρο του ακροφυσίου, ενώ η απόσταση κοπής έχει κρατηθεί σταθερή στην τιμή 58(mm). Όπως και στο προηγούμενο διάγραμμα, η αύξηση της διαμέτρου του ακροφυσίου προκαλεί αρχικά αύξηση στην τραχύτητα, αν όμως συνεχίσουμε σταδιακά αυτή την αύξηση στην διάμετρο του ακροφυσίου θα έχουμε ακριβώς το αντίθετο

αποτελέσματα, δηλαδή η τραχύτητα θα αρχίσει να μειώνεται. Αντίθετα, η απόσταση κοπής προκαλεί σταθερά αρνητική επίδραση στην τραχύτητα.



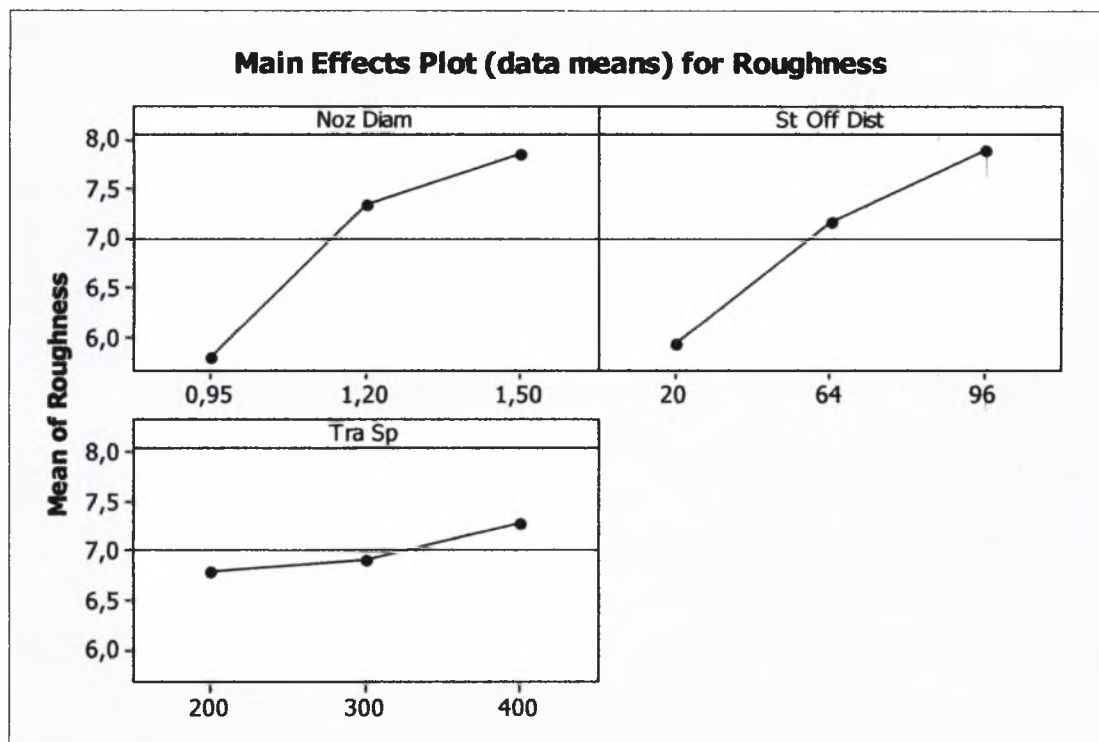
Εικόνα 9.7 Διάγραμμα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνιση της εξαρτημένης μεταβλητής, δηλαδή της τραχύτητας, και των ανεξάρτητων μεταβλητών *Noz Diam.* και *Trav. sp.* σε χάλυβα TRIP 700 CR-FH

9.5 Διαγράμματα κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων

Θα ολοκληρώσουμε την στατιστική ανάλυση μας με την παρουσίαση και ερμηνεία των διαγραμμάτων κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων

- **Κύριες επιδράσεις παραγόντων**

Οι κυρίες επιδράσεις κάθε παράγοντα θα παρουσιαστούν στο παρακάτω διάγραμμα, όπου σε κάθε επίπεδο τού κάθε παράγοντα έχουμε αντιστοιχίσει τον μέσο των παρατηρήσεων στο αντίστοιχο επίπεδο.



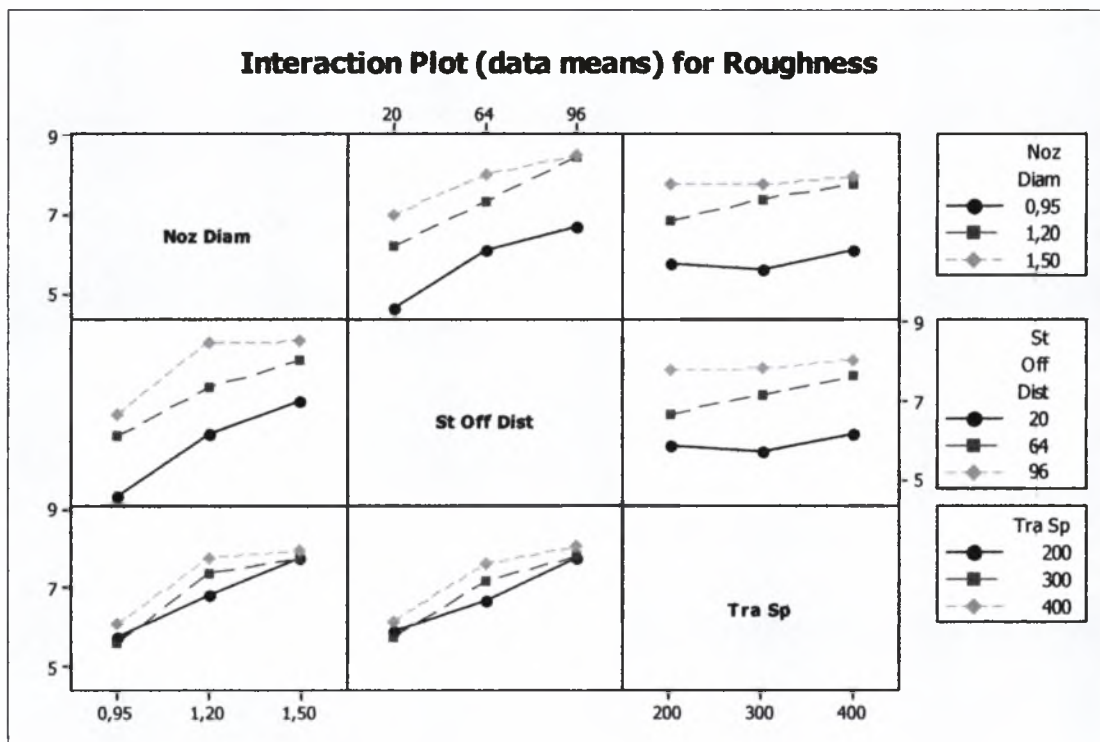
Εικόνα 9.8 Διάγραμμα κύριων επιδράσεων κάθε παράγοντα για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 700 CR-FH

Από το διάγραμμα μπορεί κανείς εύκολα να διαπιστώσει ότι οι κύριες επιδράσεις των δύο πρώτων παραγόντων επιφέρουν θετική επίδραση στις τιμές της τραχύτητας, καθώς μεταφερόμαστε σε υψηλότερα επίπεδα. Αντίθετα με τους δύο πρώτους παράγοντες, ο τρίτος έχει αρνητική επίδραση στις τιμές του μέσου εύρους, καθώς μεταφερόμαστε σε υψηλότερα επίπεδα. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι έχει την ασθενέστερη επίδραση εκ των τριών παραγόντων. Ενώ ο τρίτος παράγοντας, η ταχύτητα κοπής, έχει αρχικά μικρή θετική επίδραση στις τιμές της τραχύτητας, καθώς όμως μεταφερόμαστε σε υψηλότερα επίπεδα η ένταση της κλιμακώνεται. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι έχει την ασθενέστερη επίδραση εκ των τριών παραγόντων. Αν παρατηρήσει προσεκτικά κανείς τα διαγράμματα τρισδιάστατης γραφικής απεικόνισης σε συνδυασμό με το διάγραμμα κύριων επιδράσεων, θα διαπιστώσει μια αντίφαση. Στα μεν διαγράμματα τρισδιάστατης απεικόνισης η αύξηση της ταχύτητας κοπής έχει αρνητική επίδραση στην τραχύτητα στο δε διάγραμμα κύριων επιδράσεων η επίδραση της είναι αρνητική. Η αντίφαση αυτή έγκειται στο γεγονός ότι στα διαγράμματα τρισδιάστατης απεικόνισης λαμβάνονται υπόψιν και οι αλληλεπιδράσεις των παραγόντων που θα παρουσιαστούν παρακάτω.

- Αλληλεπιδράσεις παραγόντων

Από τα διαγράμματα των αλληλεπιδράσεων των παραγόντων, θα εξετάσουμε κατά πόσον οι κύριες επιδράσεις ενός παράγοντα είναι ίδιες σε όλα τα επίπεδα του άλλου παράγοντα. Αν αυτές είναι ίδιες, τότε αναφερόμαστε σε μη ύπαρξη αλληλεπίδρασης.

Στα διαγράμματα των αλληλεπιδράσεων έχουμε στον x-άξονα τα επίπεδα των παραγόντων και στον y-άξονα τις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής. Αν οι ευθείες των παραγόντων είναι σχεδόν παράλληλες, τότε μάλλον δεν έχουμε πρόβλημα αλληλεπίδρασης, ενώ αν οι ευθείες τέμνονται, τότε είναι σχεδόν βέβαιο ότι οι παράγοντες αλληλεπιδρούν.



Εικόνα 9.9 Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων κάθε παράγοντα για την τραχύτητα χάλυβα TRIP 700 CR-FH

Για την απόσταση κοπής δεν υπάρχει διασταύρωση γραμμών, όμως οι ευθείες των παραγόντων δεν είναι παράλληλες. Συμπεραίνουμε, έτσι, ότι οι παράγοντες αλληλεπιδρούν, αλλά χωρίς υψηλή στατιστική σημαντικότητα.

Για την διάμετρο του ακροφυσίου και την ταχύτητα κοπής εμφανίζεται διασταύρωση των γραμμών, γεγονός που σημαίνει ότι οι παράγοντες αλληλεπιδρούν με υψηλή στατιστική σημαντικότητα.

Εν κατακλείδι, μπορούμε να διαπιστώσουμε, ότι τα συμπεράσματα από την γραφική ανάλυση, συμβαδίζουν με τα συμπεράσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης και διακύμανσης, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία του στοχαστικού μοντέλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

10.1 Γενικά

Στις παρακάτω ενότητες θα γίνει μια προσπάθεια αποτίμησης της συνολικής εργασίας που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας πτυχιακής. Θα ερμηνεύσουμε και θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα ενώ, ταυτόχρονα θα προσπαθήσουμε να ελέγξουμε την ευστάθεια και την πιστότητα τους.

10.2 Αρχικά συμπεράσματα

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων θα ξεκινήσει με αναφορά στα γενικά συμπεράσματα που διεξήχθησαν με βάση το σύνολο το πειραμάτων και στην συνέχεια θα εξειδικεύσουμε σε κάθε στοχαστικό μοντέλο ξεχωριστά.

Στα μοντέλα που ανεπτύχθησαν για την στοχαστική μοντελοποίηση του μέσου εύρους όσο και της τραχύτητας, ανεξάρτητα του υλικού που χρησιμοποιήθηκε, μπορεί κανείς να διακρίνει ότι ο παράγοντας που έχει την μικρότερη επιρροή είναι η ταχύτητα κοπής (*Trav. Sp.*). Η παρατήρηση αυτή μπορεί να μας οδηγήσει σε νέα μοντέλα με διαφορετικές εξαρτημένες μεταβλητές, τα οποία θα μας προσφέρουν πιθανότατα περισσότερες πληροφορίες και θα μας δίνουν μεγαλύτερες δυνατότητες παρέμβασης προκειμένου να βελτιώσουμε την κατεργασία.

Ιδιάζουσας βαρύτητας είναι το γεγονός ότι στα στοχαστικά μοντέλα που αναπτύξαμε τόσο για το μέσο εύρος αρμού κοπής όσο και για την τραχύτητα, η επιρροή που ασκεί ο κάθε παράγοντας ακολουθεί την ίδια τάση και στον χάλυβα TRIP 700 CR-FH και στον TRIP 800 HR-FH. Το γεγονός αυτό προσδίδει επιπλέον γενικότητα στα μοντέλα που αναπτύξαμε.

Άλλη μια παρατήρηση που αξίζει να αναφερθεί είναι, ότι ανεξάρτητα από τους διαφόρους συνδυασμούς, ταχύτητας κοπής, διαμέτρου ακροφυσίου και απόστασης κοπής στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στον χάλυβα TRIP 700 CR-FH παρατηρούνται γενικά μεγαλύτερες τιμές τόσο μέσου εύρους αρμού κοπής, όσο και τραχύτητας από αυτές που παρατηρήθηκαν στα πειράματα του χάλυβα TRIP 800 HR-FH. Γεγονός που ήταν αναμενόμενο αν λάβει κανείς υπόψιν του ότι ο χάλυβας TRIP 700 CR-FH έχει πάχος 0.9 mm ενώ ο TRIP 800 HR-FH 1.25 mm.

10.3 Στοχαστικά μοντέλα

Μέσω της ανάλυσης παλινδρόμησης κατέστη δυνατό να καταρτισθούν δύο μοντέλα αρκετά καλής προσαρμογής (για την τραχύτητα και το μέσο εύρος αρμού) για κάθε υλικό (χάλυβα TRIP 700 CR-FH και TRIP 800 HR-FH). Οι υψηλοί συντελεστές προσδιορισμού και οι έλεγχοι των διαγραμμάτων καταλοίπων διασφάλισαν την ισχύ των μοντέλων, τα οποία στην συνέχεια τα χρησιμοποιήσαμε για στατική συμπερασματολογία. Ακολούθησε η τρισδιάστατη απεικόνιση των εξαρτημένων μεταβλητών με τις ανεξάρτητες μεταβλητές συνδυασμένες ανα δύο και τα διαγράμματα κυριών επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων.

Ο στατιστικά σημαντικότερος παράγοντας των μοντέλων τού μέσου εύρους αρμού κοπής και για τα δύο υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι η διάμετρος του ακροφυσίου (*Noz. Diam.*), ενώ ακολουθεί η απόσταση κοπής (*St Off Dist.*) Σημαντικότερη αλληλεπίδραση για τον μεν TRIP 800 HR-FH είναι το γινόμενο της διαμέτρου του ακροφυσίου με την ταχύτητα κοπής $Noz\ Diam * Tra\ Sp$, ενώ για τον TRIP 700 CR-FH είναι γινόμενο απόστασης κοπής με την ταχύτητα κοπής $St\ Off\ Dist * Tra\ Sp$.

Ο στατιστικά σημαντικότερος παράγοντος του μοντέλου τραχύτητας για τον μεν TRIP 800 HR-FH είναι η απόστασης κοπής (*St Off Dist*) ενώ ακολουθεί με πολύ μικρή διαφορά η διάμετρος του ακροφυσίου (*Noz. Diam.*). Το ίδιο συμβαίνει και για τον TRIP 700 CR-FH. Μοναδική και αρκετά σημαντική αλληλεπίδραση για το μοντέλο TRIP 800 HR-FH είναι το γινόμενο της διαμέτρου του ακροφυσίου με την ταχύτητα κοπής $Noz\ Diam * Tra\ Sp$, για το μοντέλο TRIP 700 CR-FH δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω δεδομένα σε ένα πίνακα μπορούμε να κάνουμε μια σχετική σύγκριση των μοντέλων.

	Y_1 (TRIP 700)	Y_1 (TRIP 800)	Y_2 (TRIP 800)	Y_2 (TRIP 700)
<i>R-Sq</i>	93,51%	97,51%	91,62%	90,45%
Ικανοποίηση προϋποθέσεων ισχύος	πλήρης	πλήρης	πλήρης	πλήρης
Στατιστικά σημαντικότερος παράγοντας	Διάμετρος του ακροφυσίου (<i>Noz. Diam.</i>)	Διάμετρος του ακροφυσίου (<i>Noz. Diam.</i>)	Απόστασης κοπής (<i>St Off Dist</i>)	Απόστασης κοπής (<i>St Off Dist</i>)
Στατιστικά σημαντικότερή αλληλεπίδραση	<i>Noz Diam*Tra Sp</i>	<i>St Off Dist*Tra Sp</i>	<i>Noz Diam*Tra Sp.</i>	-

Πίνακας 10.1 Συγκριτικά δεδομένα στοχαστικής μοντελοποίησης.

Με τα μοντέλα υψηλής ακρίβειας που αναπτύχθηκαν για το μέσο εύρος αρμού κοπής και τη τραχύτητα, είμαστε σε θέση να βελτιστοποιήσουμε τις συνθήκες κατεργασίας κοπής με πίδακα νερού υψηλής πίεσης σε συναφείς περιπτώσεις. Λαμβάνοντας υπόψη το μοντέλο και τις πληροφορίες που αυτό μας παρέχει για τις παραμέτρους κατεργασίας, έχουμε τη δυνατότητα να επιλέξουμε τις τιμές αυτών ανάλογα με τα κριτήρια τα οποία θέτουμε για να διασφαλίσουμε την επιτυχία της κατεργασίας

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**➤ Βιβλία**

- [1] Π. Γ. Πετρόπουλου, "Μηχανουργική Τεχνολογία – Τεχνολογία Κατεργασιών Κοπής των Μέταλλων – ΤΟΜΟΣ ΙΙ-1", Εκδόσεις Ζήτη, 1991.
- [2] Π. Γ. Πετρόπουλου, "Μαθήματα Μηχανουργικής Τεχνολογίας – Θεωρία Και Τεχνολογία Μηχανουργικών Κατεργασιών Των Μετάλλων ΤΕΥΧΟΣ ΙΙ", Εκδόσεις Ζήτη, 1991.
- [3] Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος, "Φυσική Μεταλλουργία – Θεμελιώδεις Αρχές", Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, 2000.
- [4] Armin Steinmuller- Haan Grruiten, "Τεχνολογία Μηχανολογικών Κατασκευών", Εκδόσεις ΙΩΝ, 1998.
- [5] Αθανασίου Γ. Μάμαλη, "Τεχνολογία Των Κατεργασιών Των Υλικών : Μη Συμβατικές Κατεργασίες", Εκδόσεις ΑΝΩΣΗ, 2000.
- [6] Χρησούλα Ζαχαροπούλου, "Στατιστική: Μέθοδοι-Εφαρμογές, ΤΟΜΟΣ Β", Εκδόσεις ΣΟΦΙΑ, 1998.
- [7] Αναστασιος Β. Κάτος, "Στατιστική", Εκδόσεις ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ, 1998.
- [8] Παναγιώτου Ν. Γεοργούση, "Στατιστική Εφαρμοσμένη Στης Επιστήμης Της Συμπεριφοράς ΤΟΜΟΣ Α Περιγραφική Στατιστική", 1995.
- [9] Ε. Μπόρα- Χ. Μωησιάδης, "Εφαρμοσμένη Στατιστική Πολλαπλή Παλινδρομική Ανάλυση Διασποράς Χρονοσειρές", Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 1992.

➤ Δημοσιεύσεις

- [1] J. Wang, W.C.K. Wong "Study of abrasive waterjet cutting of metallic coated sheet steels" International Journal of Machine & Manufacture, 39 (1999) 855-870
- [2] By Ted Giese, "Waterjetting to higher production" Tooling & Production - Today - Current Edition – Feature.
- [3] By Margaret B. Von Steeg, "Cutting with the Jet Set" Society Manufacturing Engineers, 10/12/2001
- [4] Adnan Akkurt, Mustafa Kemal Kulekci, Ulvi Seker and Fevzi Ercan "Effect of feed rate on surface roughness in abrasive waterjet cutting applications " Journal of Materials Processing Technology, Volume 147, Issue 3, 20 April 2004, Pages 389-396

[5] Mustafa Kemal Kulekci, "Waterjetting to higher production" Volume 42, Issue 12, September 2002, Pages 1297-1306.

[6] Robert B. Aronson, "Waterjets Move into the Mainstream" Manufacturing Engineering April 2005 Vol. 134 No. 4

➤ Διευθύνσεις

[1] www.waterjet.org

[2] www.sme.org

[3] [http://news.thomasnet.com/IMT/index.html?WT.mc_t=imt&WT.mc_n=site e
ntry](http://news.thomasnet.com/IMT/index.html?WT.mc_t=imt&WT.mc_n=site_entry)

[4] www.thefabricator.com/Default.cfm

[5] www.rapidcreekcutters.com/index.html

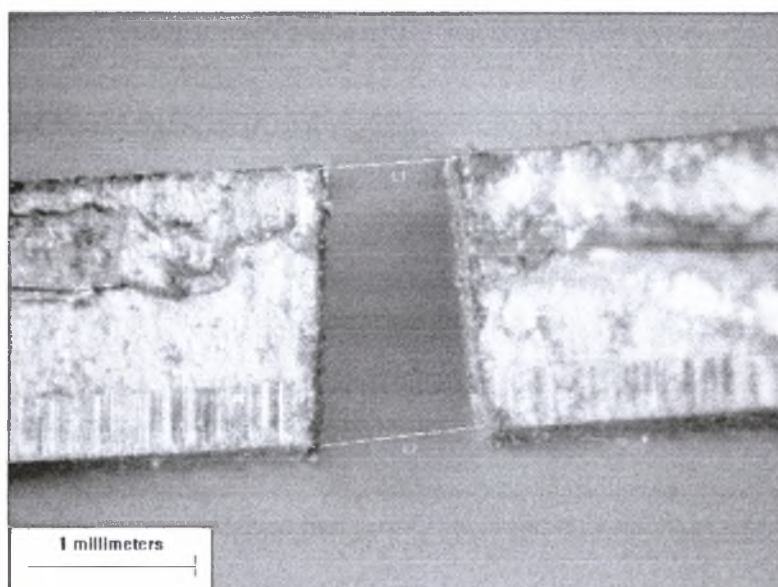
[6] www.omas.com

[7] www.minitab.com

[8] www.taylor-hobson.com

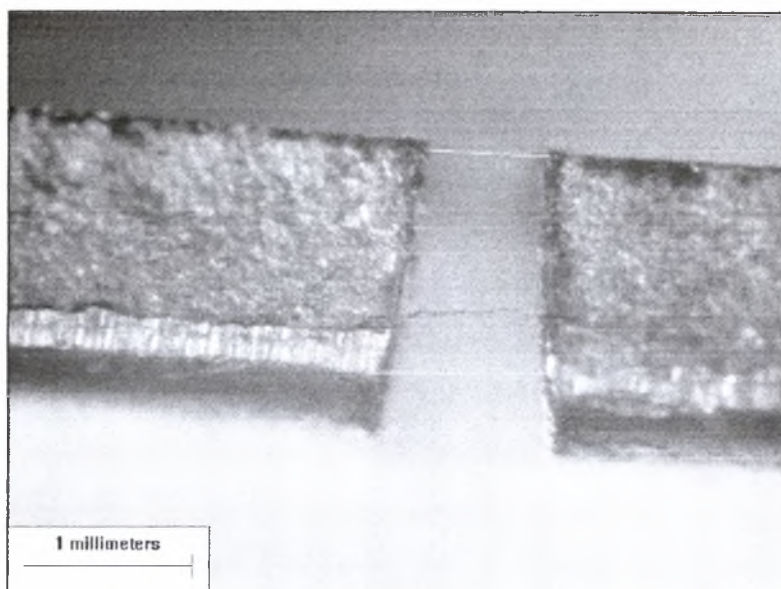
Παράρτημα ΑΦωτογραφίες αρμού κοπής για TRIP 800 HR-FH

Στις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε τον αρμό κοπής σε δοκίμιο χάλυβα TRIP 800 HR-FH . Οι συνθήκες κατεργασίας καθώς και το εύρος κορυφής και κατώτερου σημείου φαίνονται στους αντίστοιχους πίνακες.



Εικόνα 1Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
95	20	200	1,050589	0,781082	0.915834



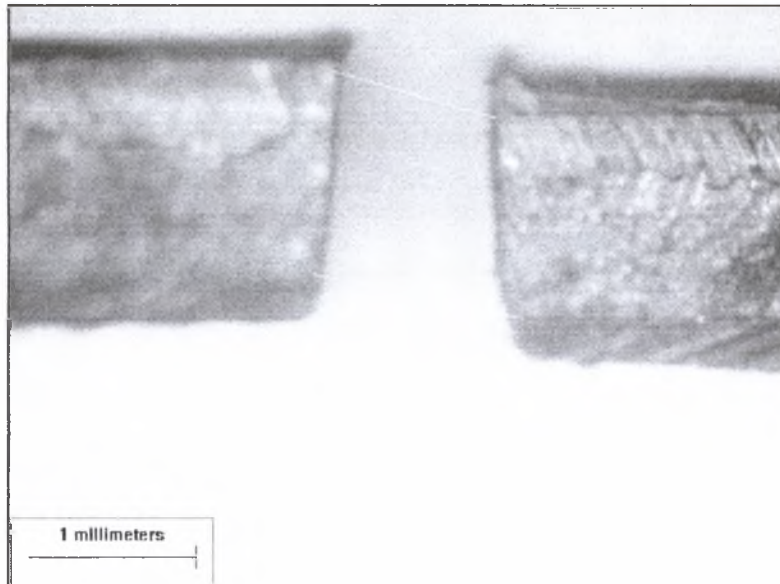
Εικόνα 2Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
0,95	20	300	1,049494	0,694612	0,872053



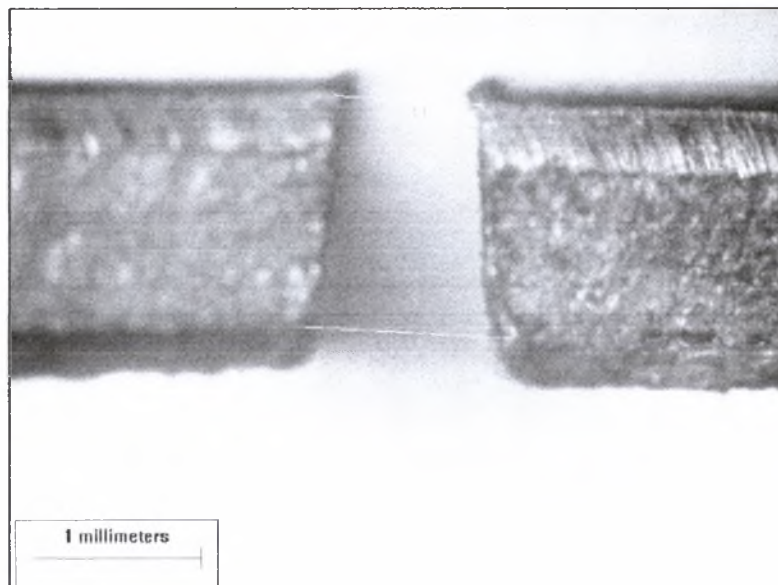
Εικόνα 3Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
0,95	20	400	1,041898	0,6740846	0,857991



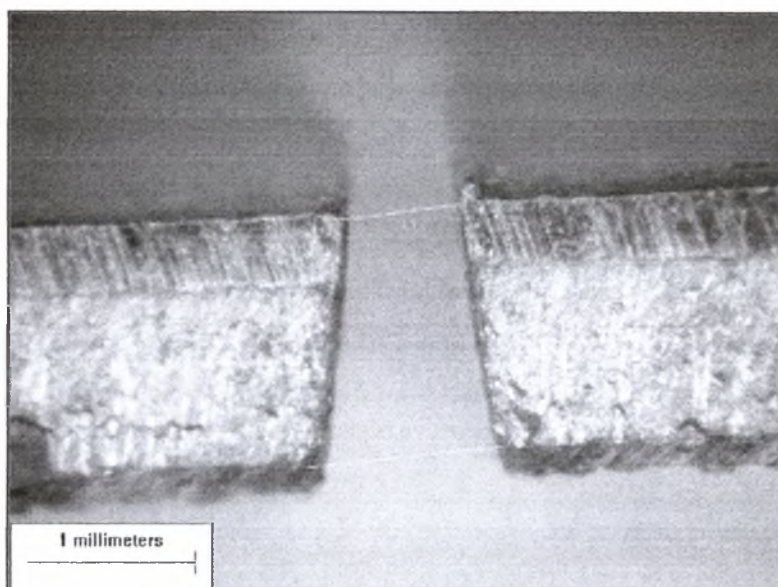
Εικόνα 4Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
0,95	64	200	1,258419	0,9682196	1,113319



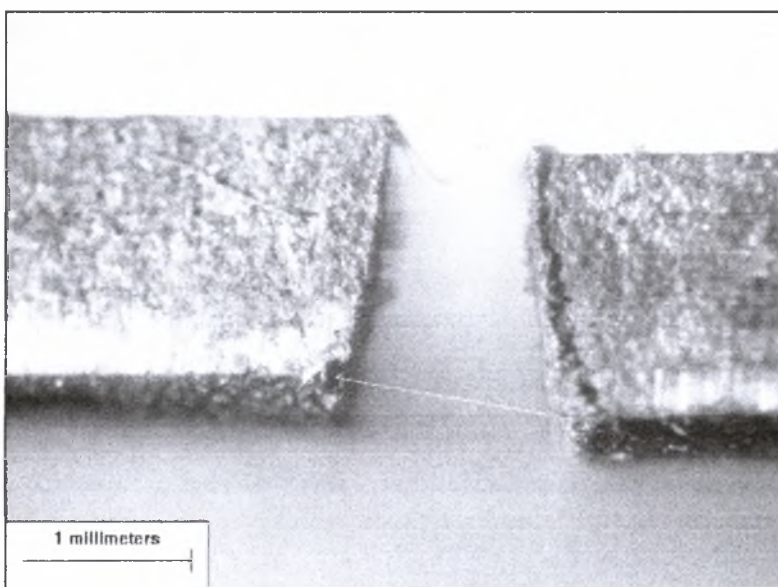
Εικόνα 5Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
0,95	64	300	1,318912	0,8346878	1,0768



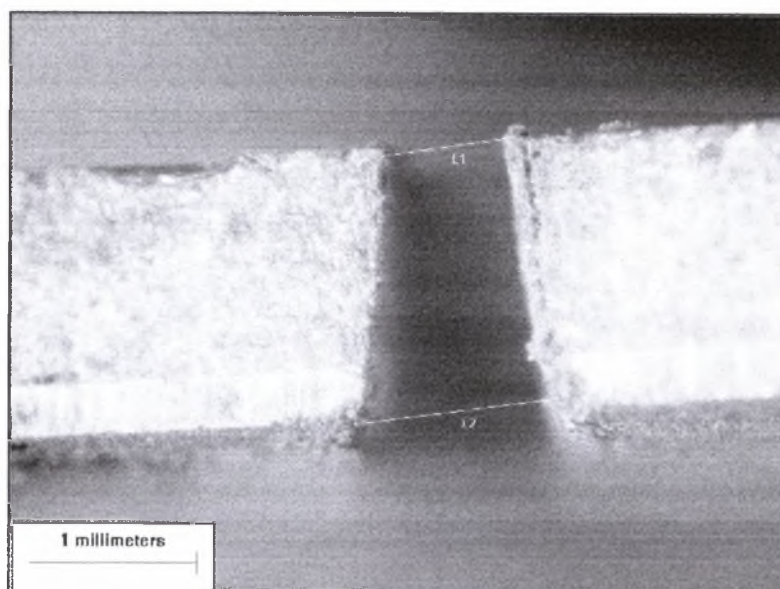
Εικόνα 6Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
0,95	64	400	1,196878	0,7348019	0,96584



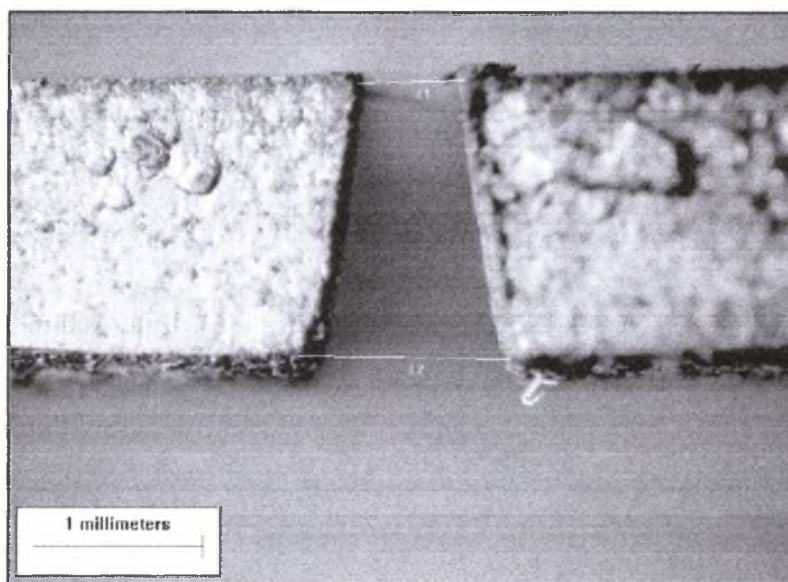
Εικόνα 7Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
0,95	96	200	1,481809	0,8479576	1,164883



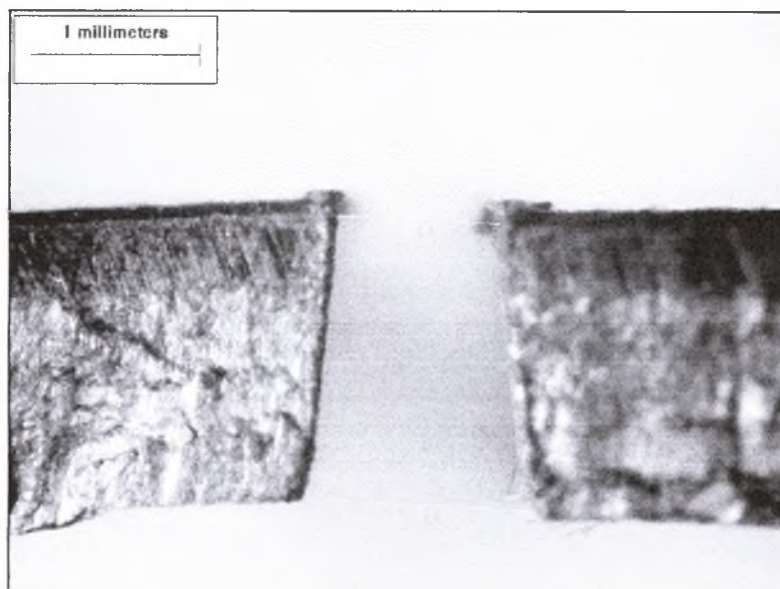
Εικόνα 8Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
0,95	96	300	1,121134	0,7837332	0,952434



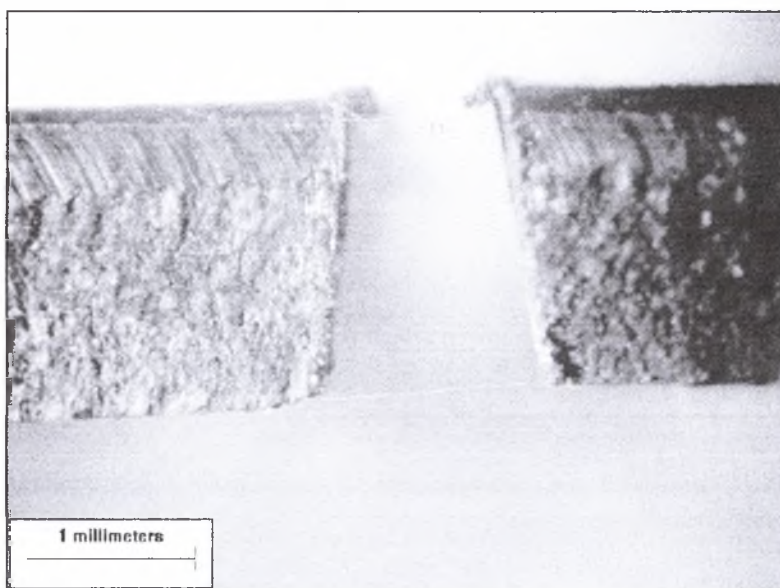
Εικόνα 9Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
0,95	96	400	1,189078	0,6591651	0,924122



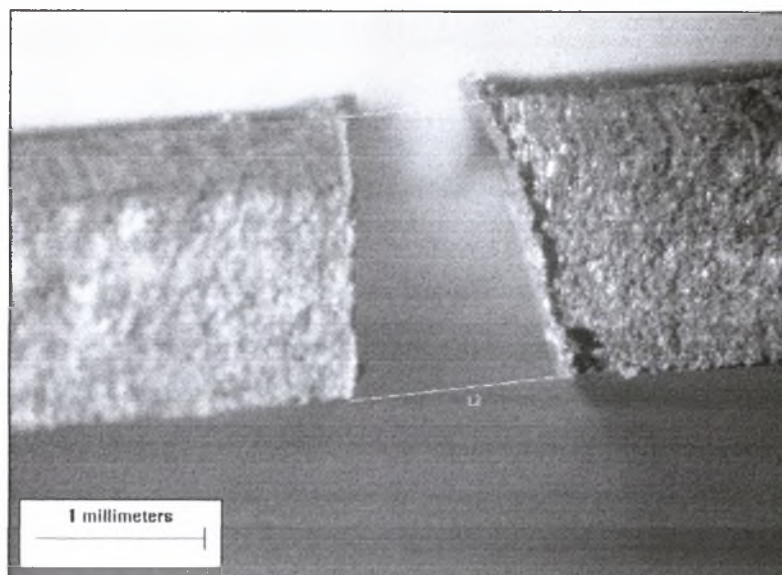
Εικόνα 10Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,2	20	200	1,341611	1,027949	1,18478



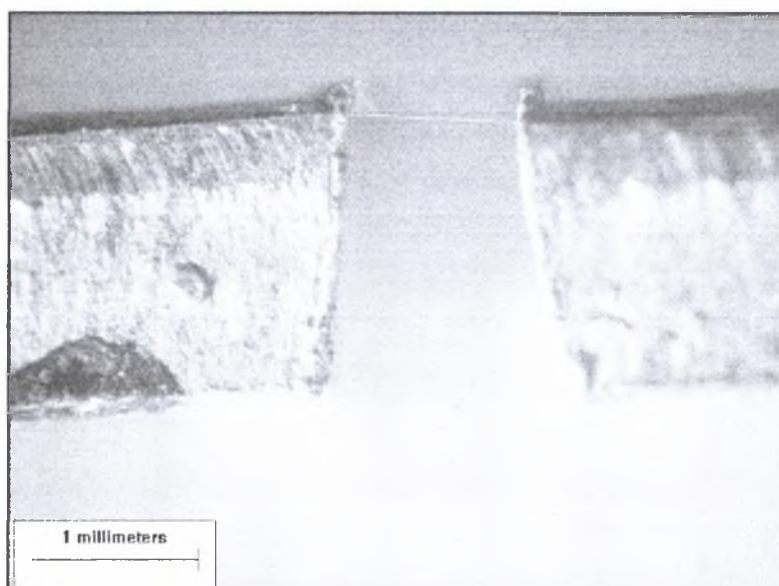
Εικόνα 11Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,2	20	300	1,38369	0,9675967	1,175643



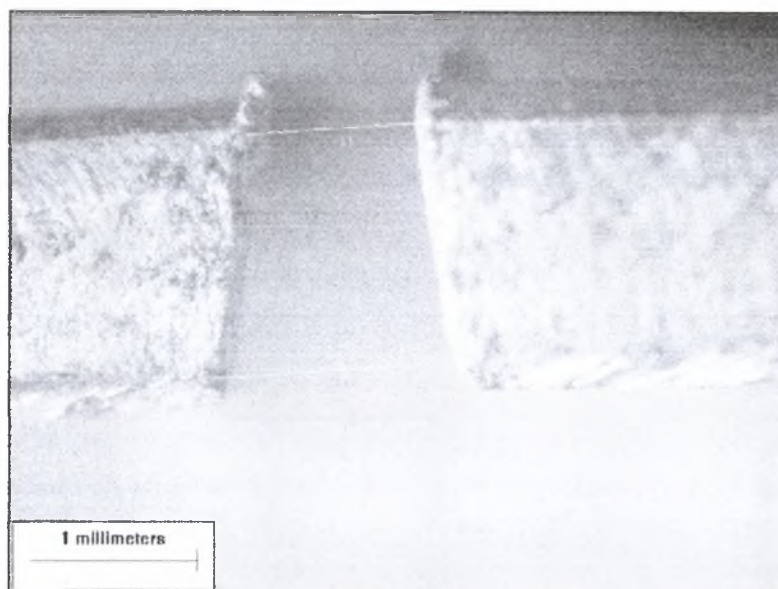
Εικόνα 12Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,2	20	400	1,297747	0,7988648	1,048306



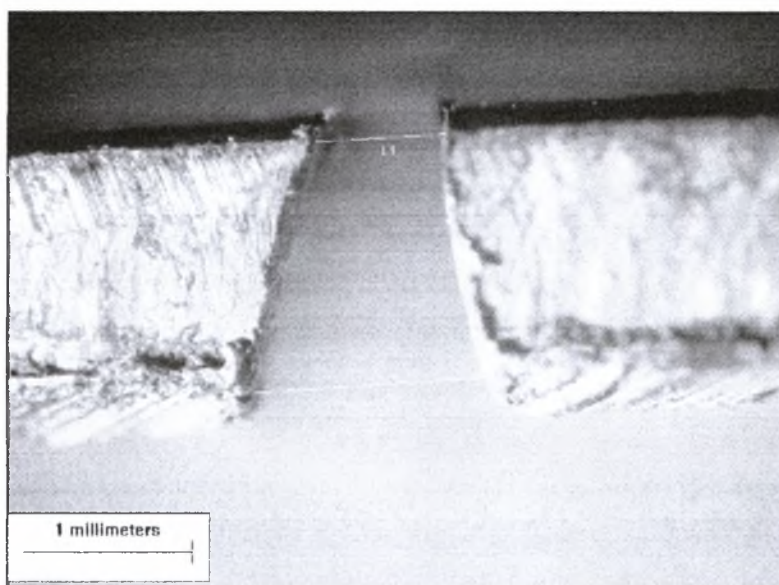
Εικόνα 13Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,2	64	200	1,51619	1,054983	1,285587



Εικόνα 14Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,2	64	300	1,546966	1,09829	1,322628



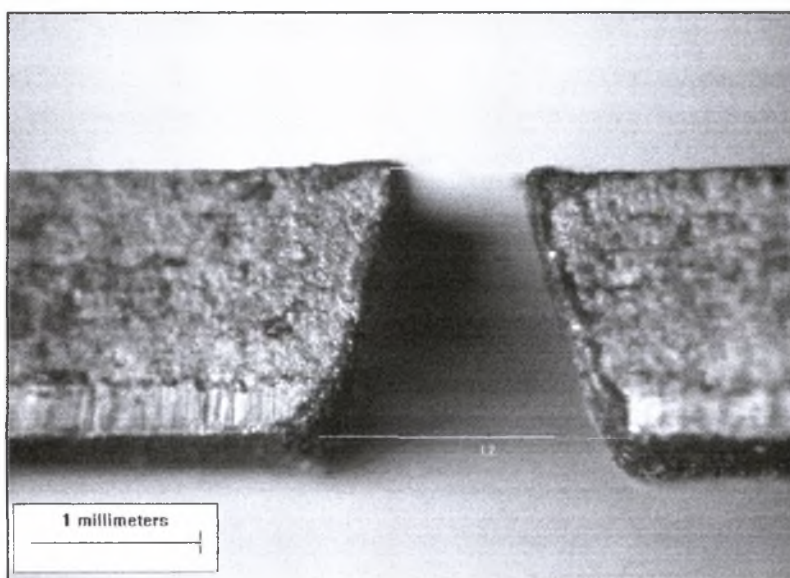
Εικόνα 15Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,2	64	400	1,46645	0,8350313	1,150741



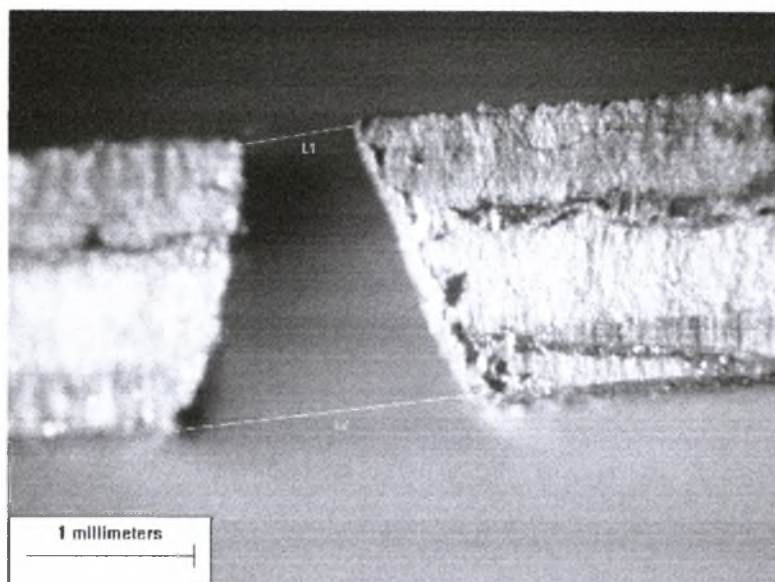
Εικόνα 16Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,2	96	200	1,832747	1,063231	1,447989



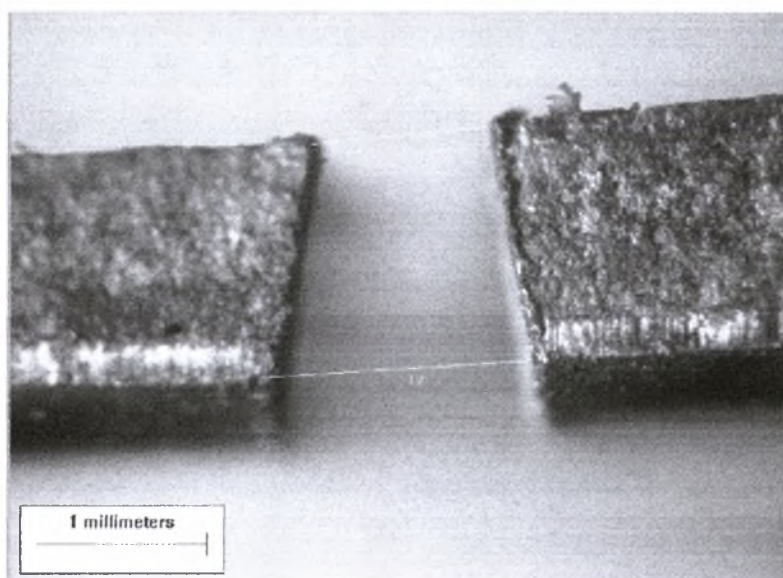
Εικόνα 17Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,2	96	300	2,044533	0,8250095	1,434771



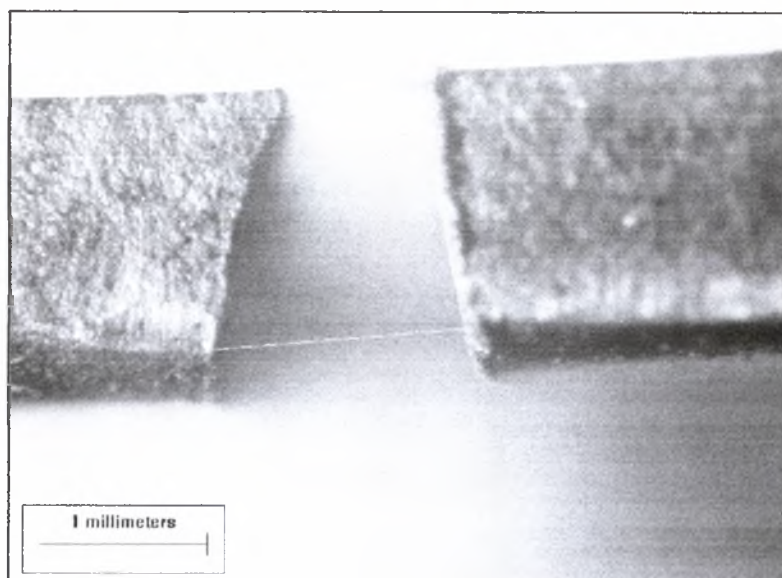
Εικόνα 18Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,2	96	400	1,848184	0,6830564	1,26562



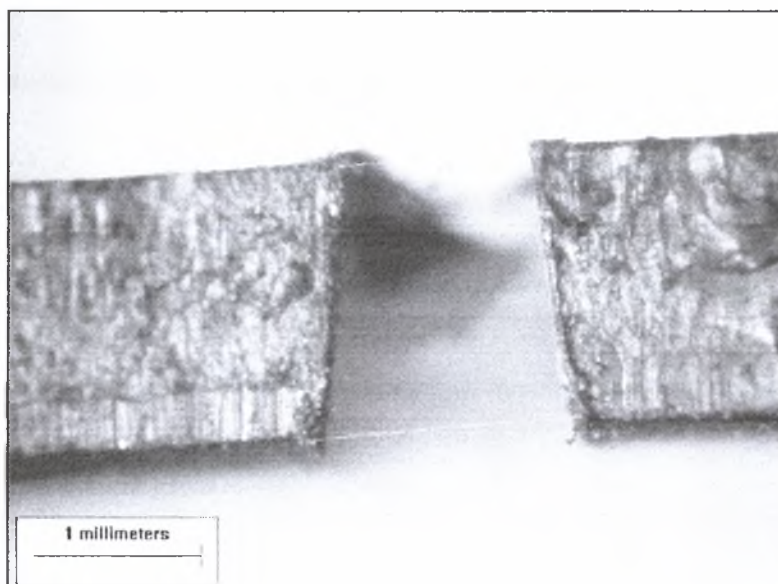
Εικόνα 19Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,5	20	200	1,610482	1,09578	1,353131



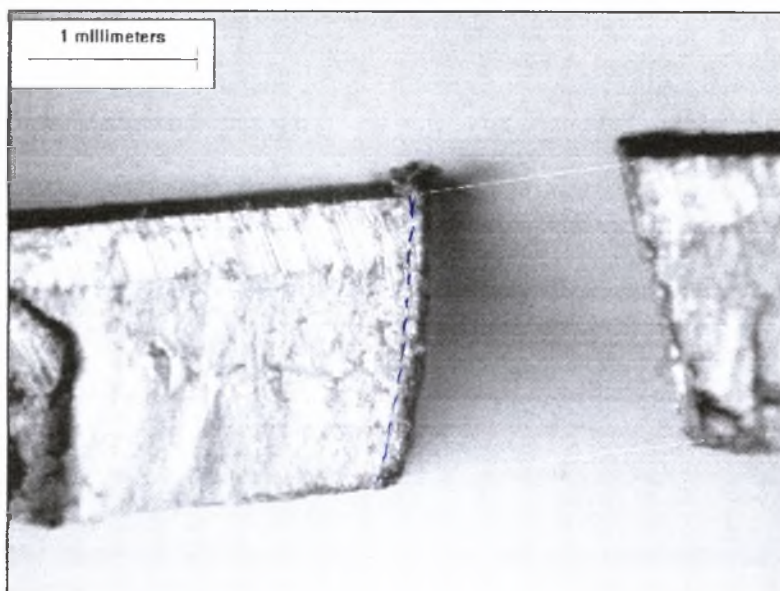
Εικόνα 20Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,5	20	300	1,581554	0,8683997	1,224977



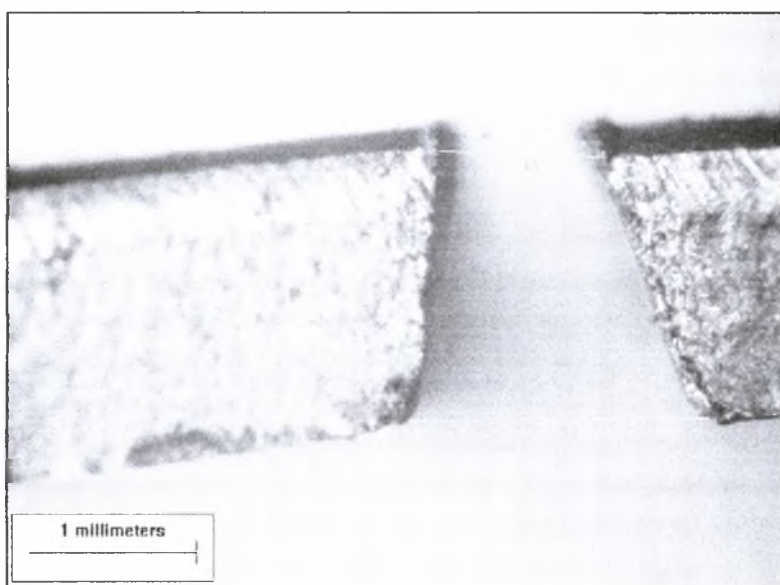
Εικόνα 21Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,5	20	400	1,629204	1,140252	1,384728



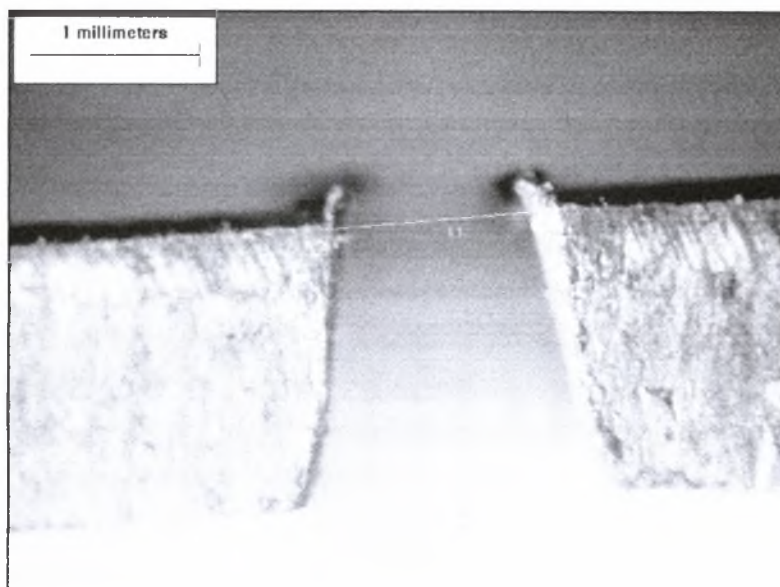
Εικόνα 22Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,5	64	200	1,735316	1,2673	1,501308



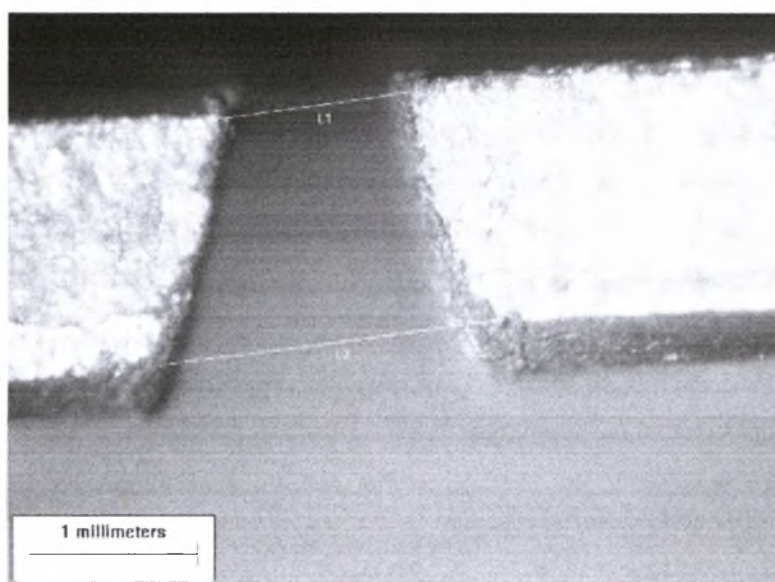
Εικόνα 23Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,5	64	300	1,751116	0,9455239	1,34832



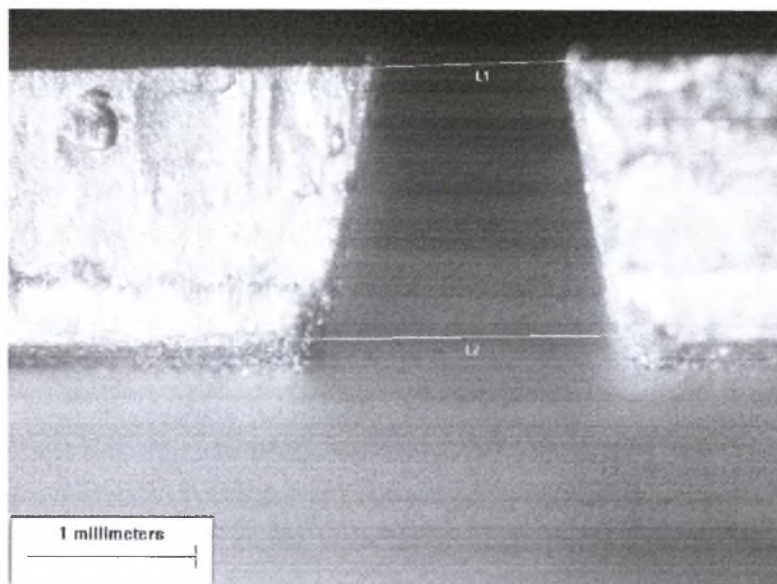
Εικόνα 24Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L ₁ (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L ₂ (mm)	Kerf (mm)
1,5	64	400	1,89891	1,334515	1,616713



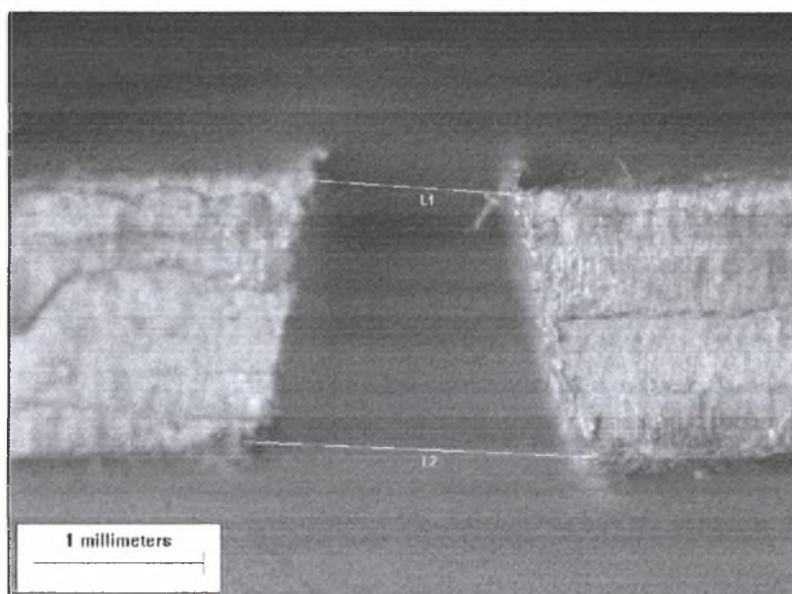
Εικόνα 25Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L ₁ (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L ₂ (mm)	Kerf (mm)
1,5	96	200	2,048307	1,128552	1,58843



Εικόνα 26Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,5	96	300	1,971902	1,148196	1,560049

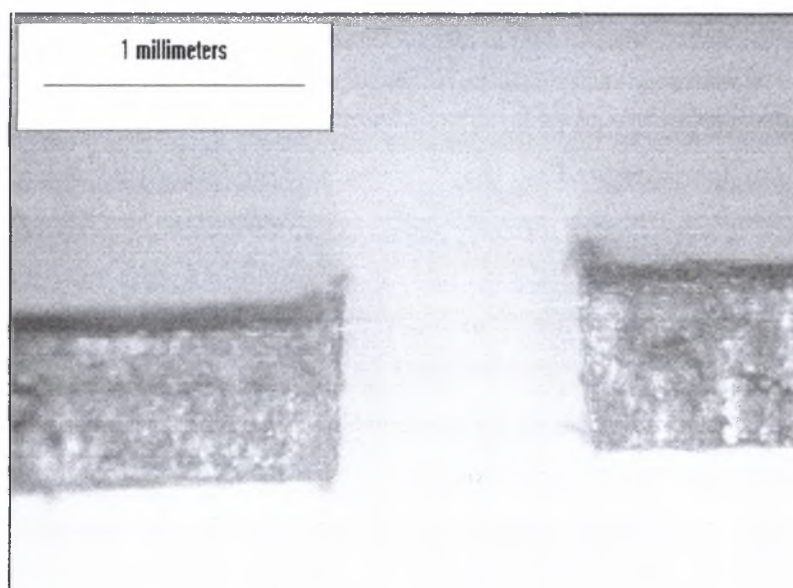


Εικόνα 27Α. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,5	96	400	1,868182	1,165235	1,516709

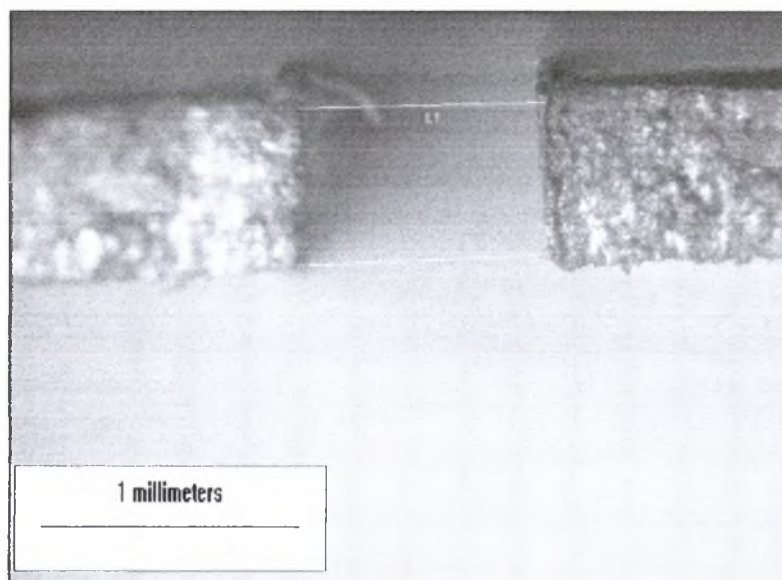
Φωτογραφίες αρμού κοπής για TRIP 700 CR-FH

Όπως έγινε και για τα δοκίμια χάλυβα TRIP 800 HR-FH έτσι και για τον χάλυβα 700 CR-FH θα παρουσιάσουμε τις φωτογραφίες του αρμού κοπής. Οι συνθήκες κατεργασίας καθώς και το εύρος κορυφής και κατώτερου σημείου φαίνονται στους αντίστοιχους πίνακες.



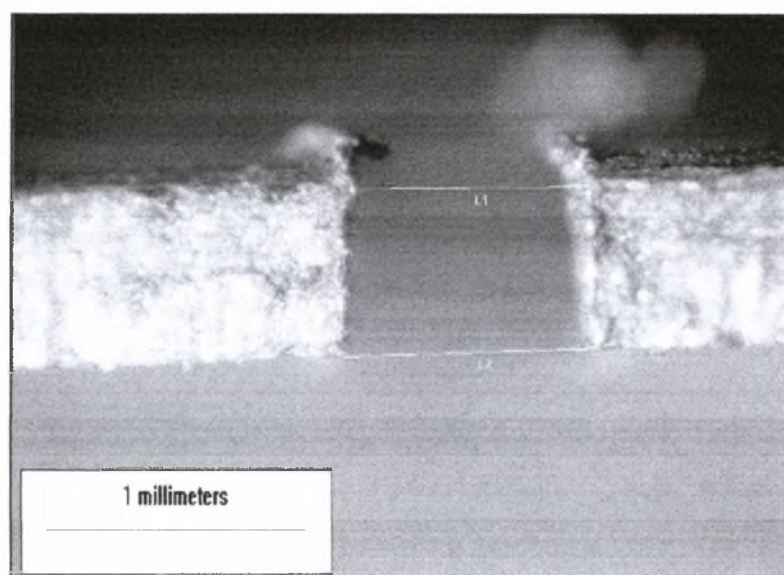
Εικόνα 1Β. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
0,95	20	200	1,013965	0,9421119	0,9780385



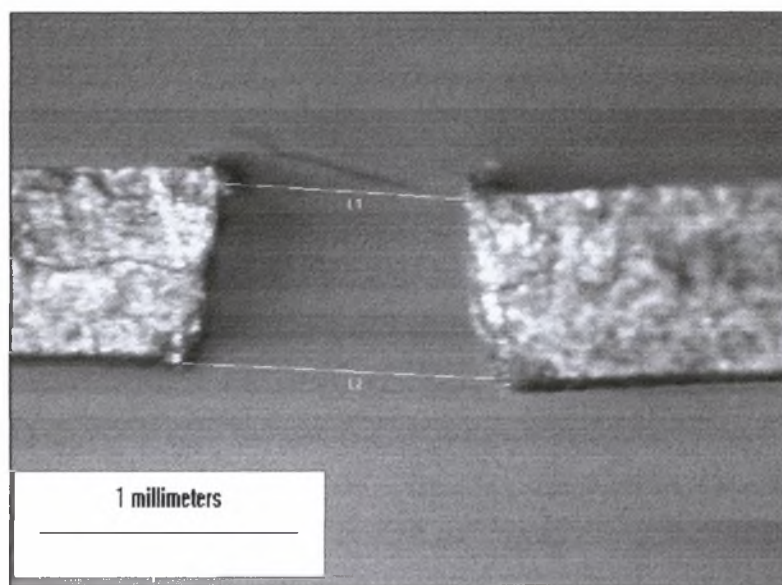
Εικόνα 2B. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L ₁ (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L ₂ (mm)	Kerf (mm)
0,95	20	300	1,075429	0,9777677	1,0265984



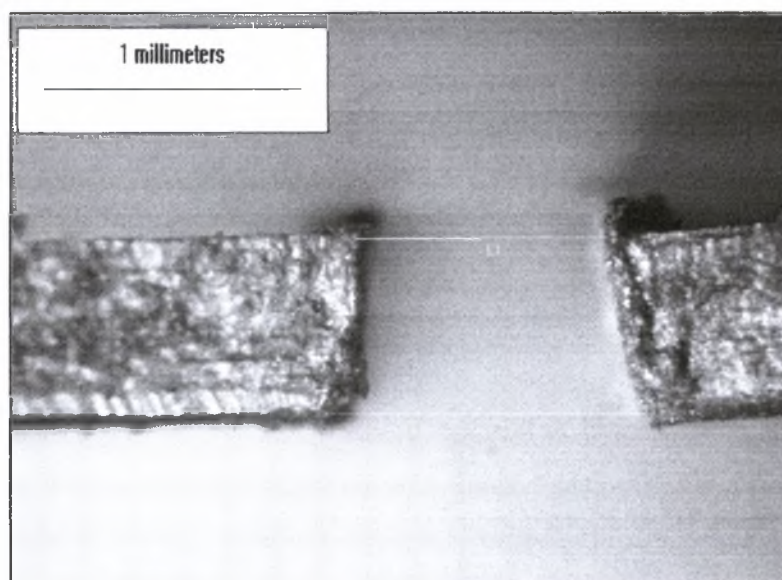
Εικόνα 3B. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L ₁ (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L ₂ (mm)	Kerf (mm)
0,95	20	400	0,9902815	0,9321296	0,9612056



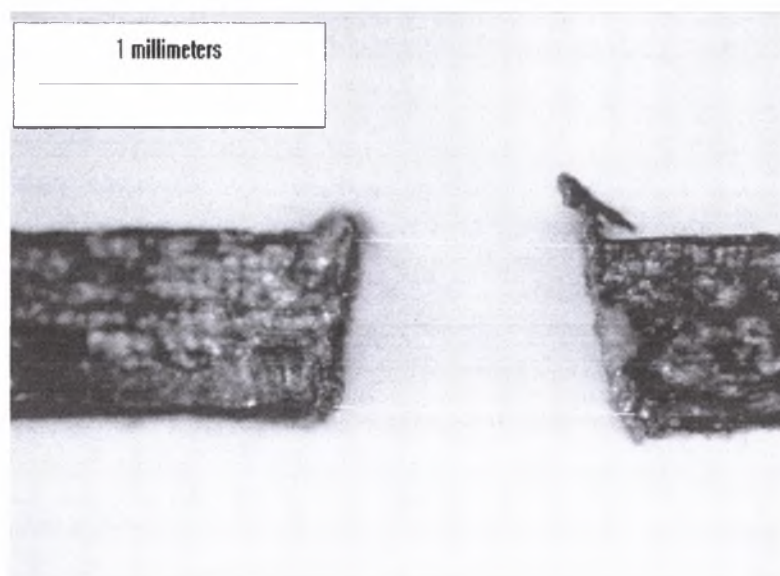
Εικόνα 4B. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L ₁ (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L ₂ (mm)	Kerf (mm)
0,95	64	200	1,241622	0,9888779	1,11525



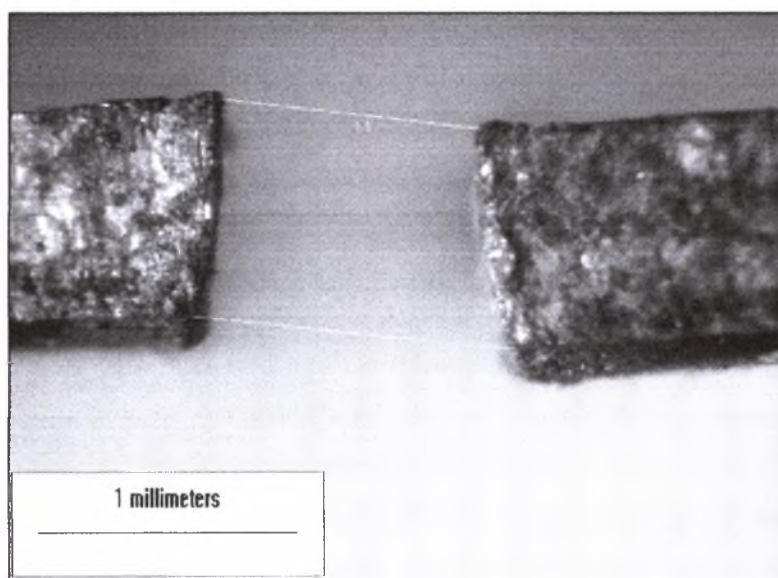
Εικόνα 5B. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L ₁ (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L ₂ (mm)	Kerf (mm)
0,95	64	300	1,307238	1,003575	1,1554065



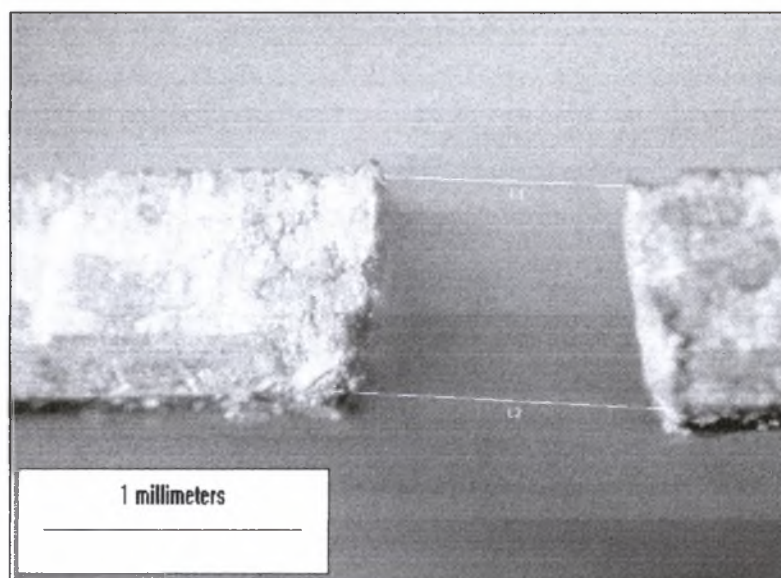
Εικόνα 6B. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
0,95	64	400	1,229419	0,9477089	1,088564



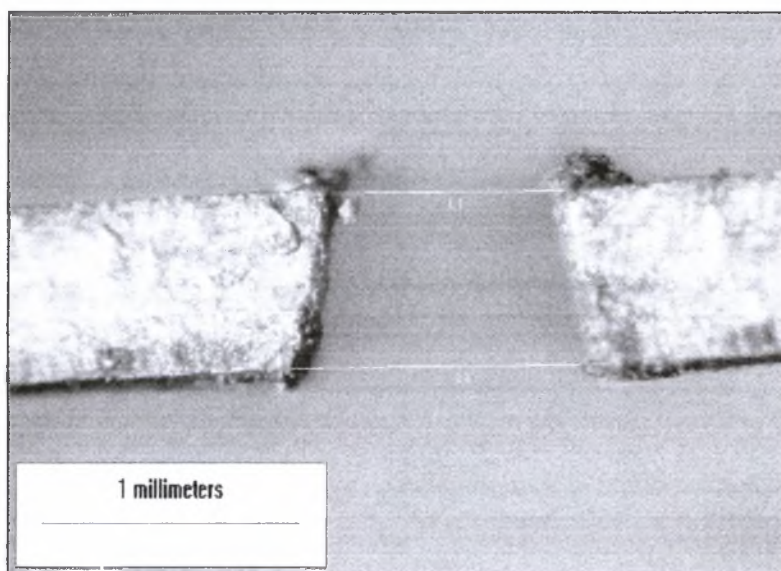
Εικόνα 7B. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
0,95	96	200	1,300649	1,026047	1,163348



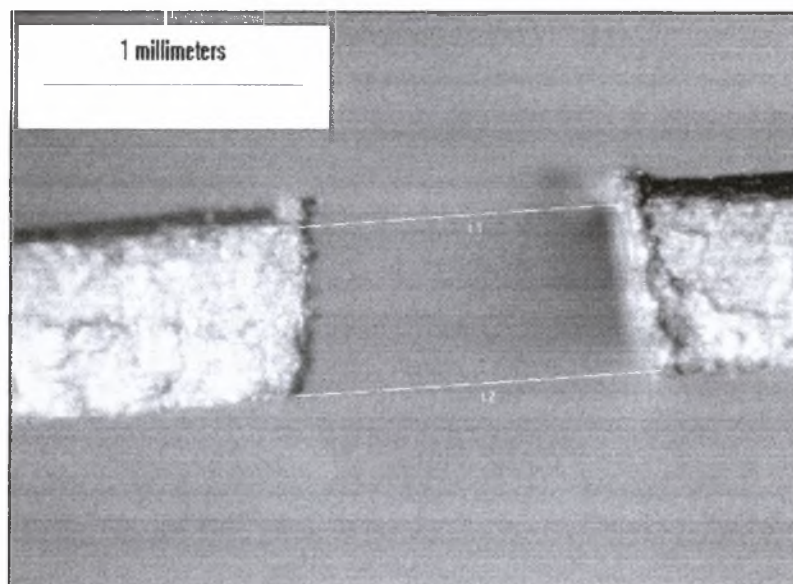
Εικόνα 8B. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L ₁ (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L ₂ (mm)	Kerf (mm)
0,95	96	300	1,296681	0,9833708	1,1400259



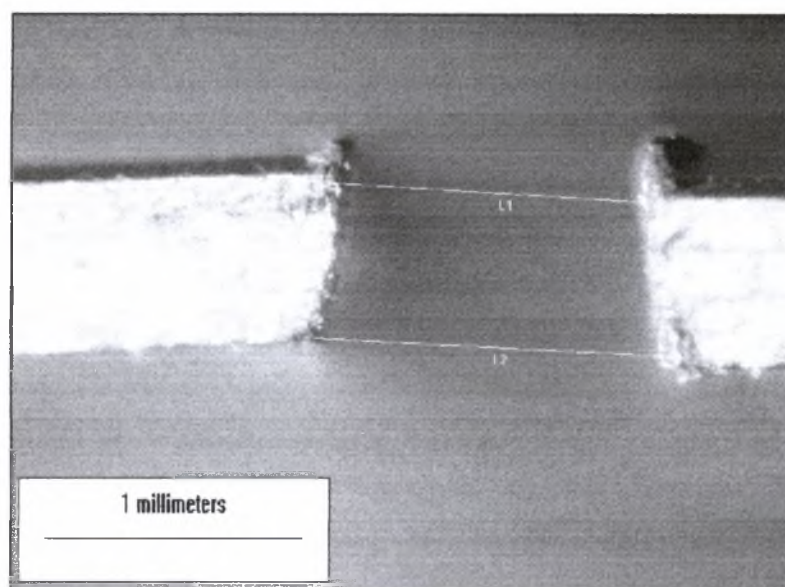
Εικόνα 9B. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L ₁ (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L ₂ (mm)	Kerf (mm)
0,95	96	400	1,228063	0,9360303	1,0820467



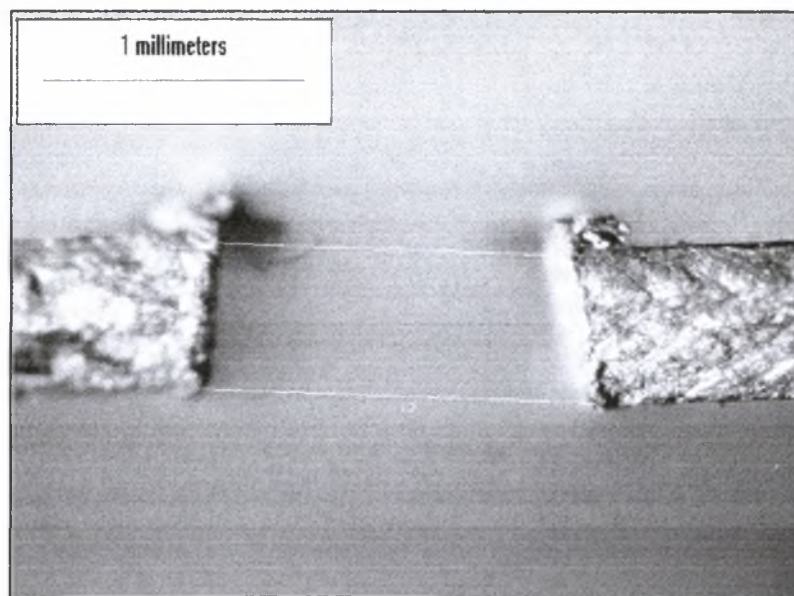
Εικόνα 10B. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,2	20	200	1,430681	1,270501	1,350591



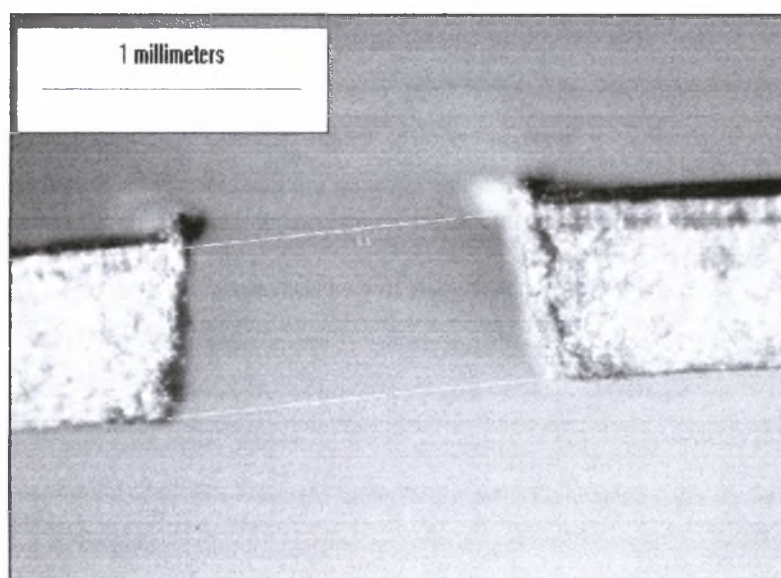
Εικόνα 11B. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,2	20	300	1,405438	1,253436	1,329437



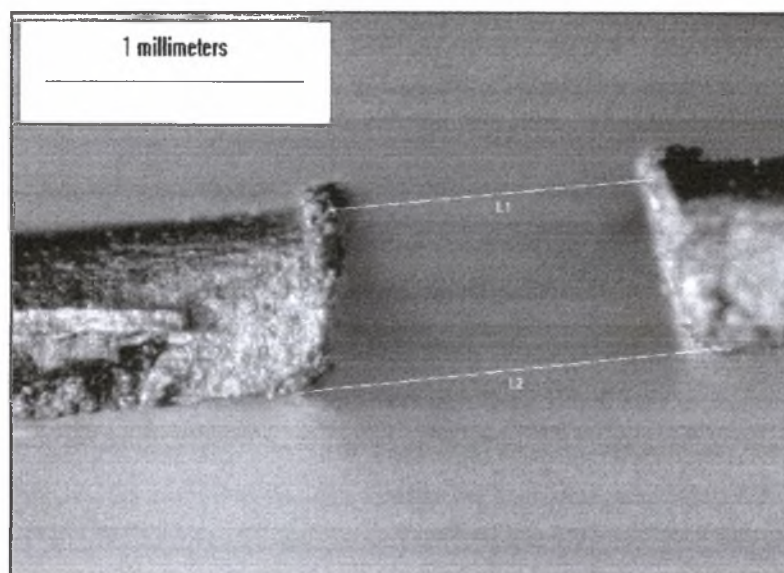
Εικόνα 12Β. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,2	20	400	1,414585	1,256	1,3352925



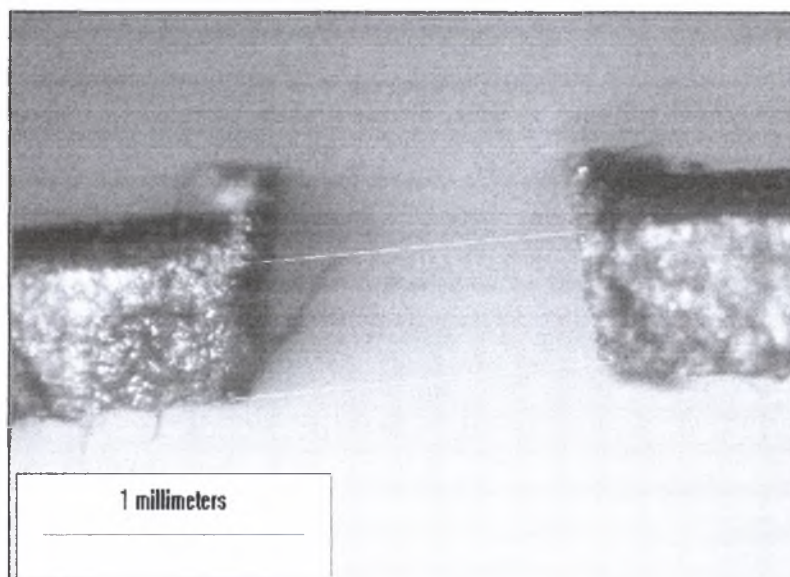
Εικόνα 13Β. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,2	64	200	1,505751	1,337488	1,4216195



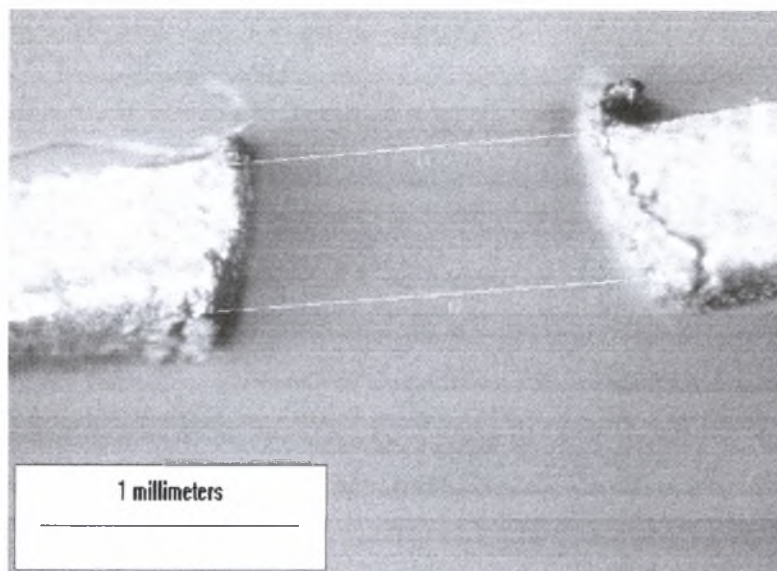
Εικόνα 14B. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L ₁ (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L ₂ (mm)	Kerf (mm)
1,2	64	300	1,491772	1,354475	1,4231235



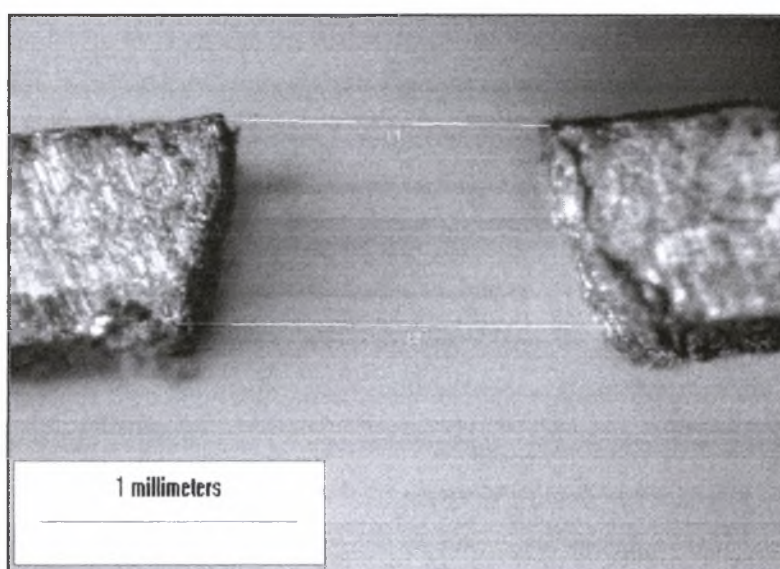
Εικόνα 15B. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L ₁ (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L ₂ (mm)	Kerf (mm)
1,2	64	400	1,447133	1,290046	1,3685895



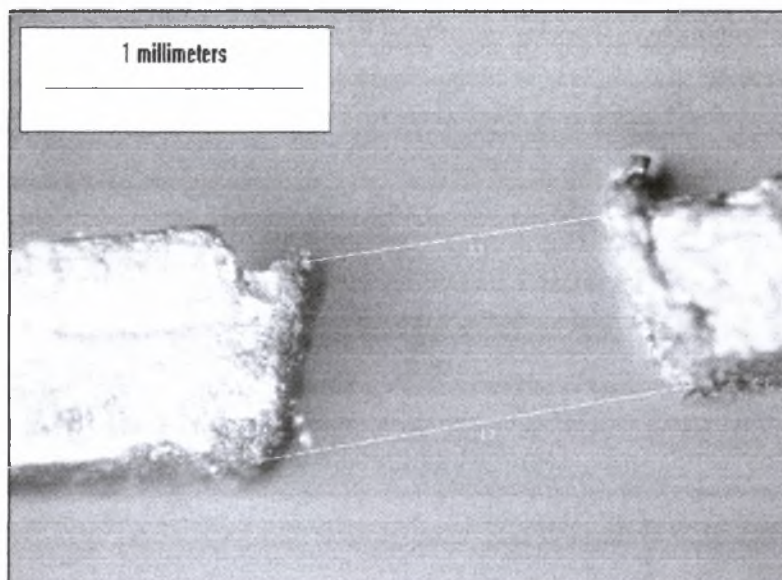
Εικόνα 16B. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,2	96	200	1,801614	1,418444	1,610029



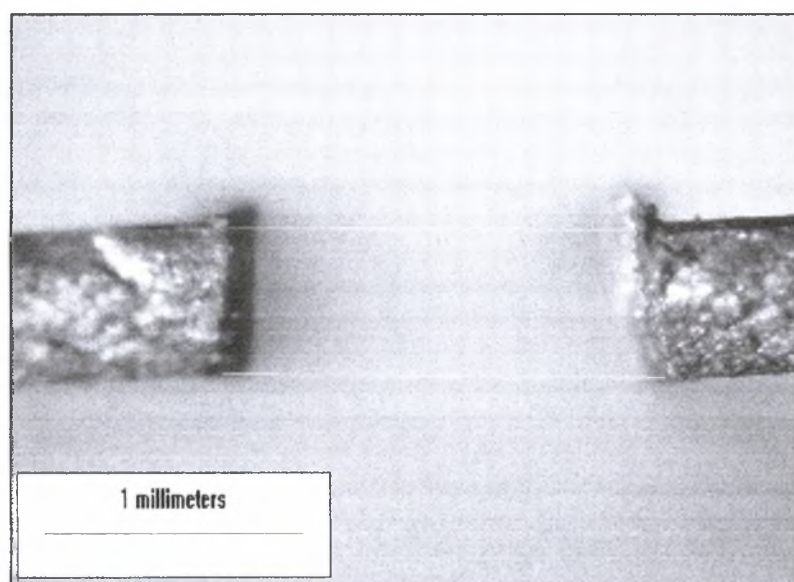
Εικόνα 17B. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,2	96	300	1,833188	1,281365	1,5572765



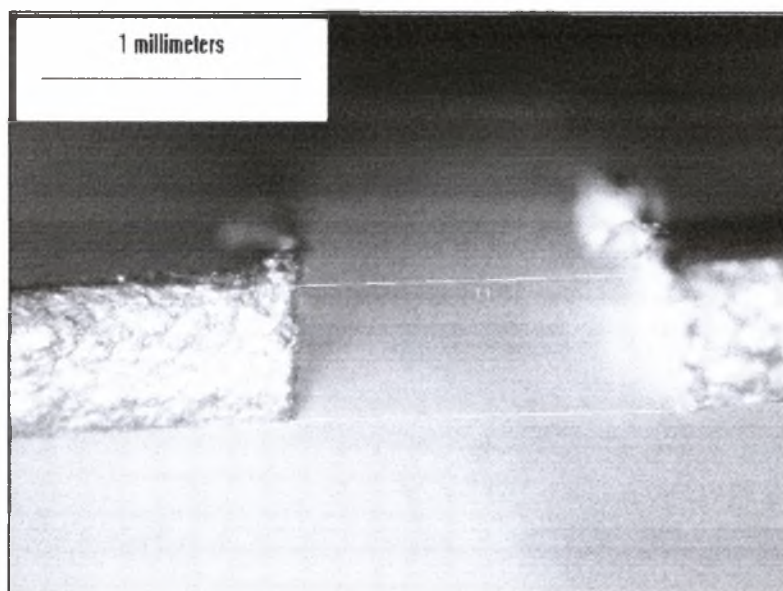
Εικόνα 18B. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L ₁ (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L ₂ (mm)	Kerf (mm)
1,2	96	400	1,607525	1,287112	1,4473185



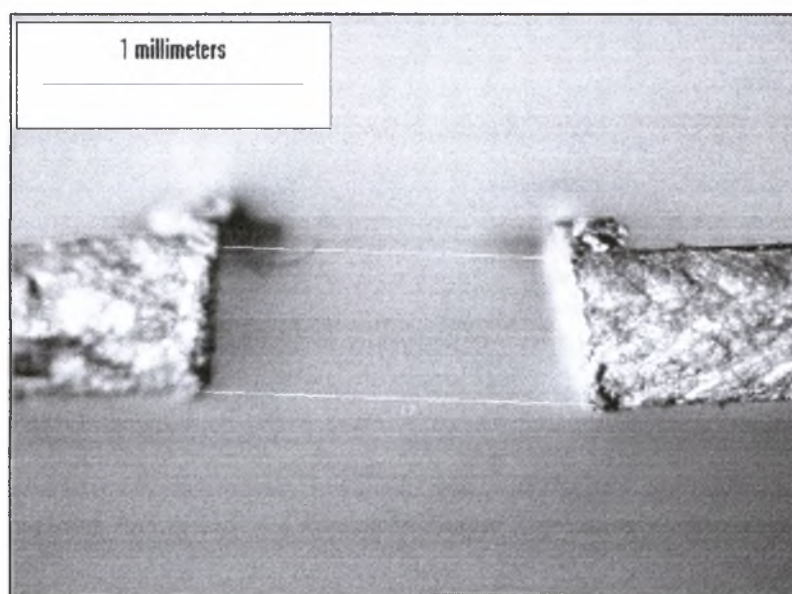
Εικόνα 19B. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L ₁ (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L ₂ (mm)	Kerf (mm)
1,5	20	200	1,719299	1,582905	1,651102



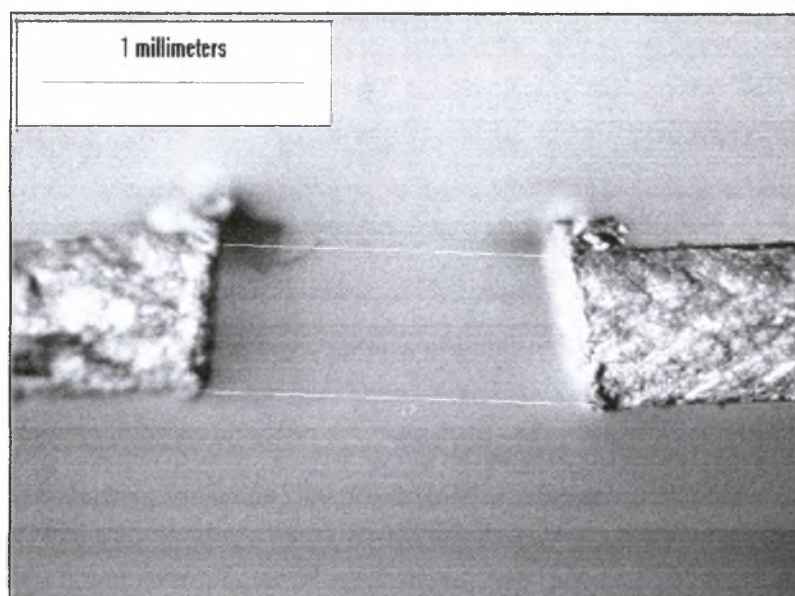
Εικόνα 20B. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,5	20	300	1,52795	1,400982	1,464466



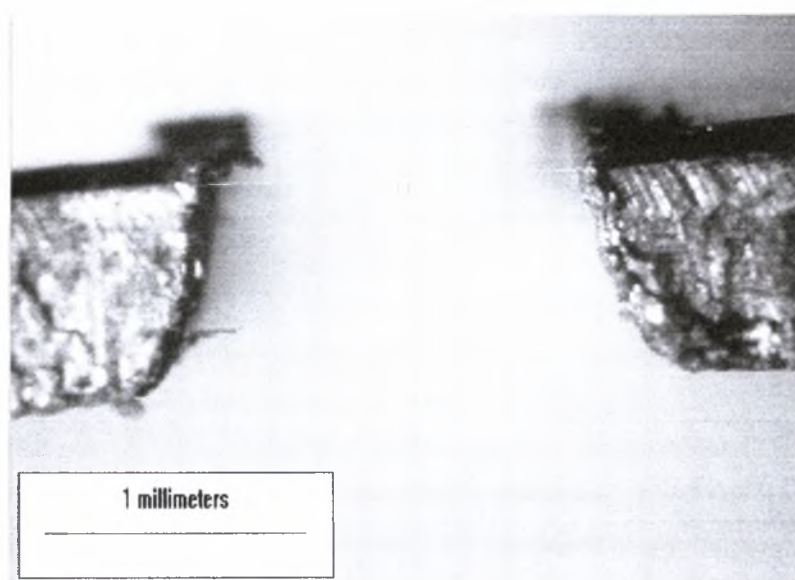
Εικόνα 21B. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,5	20	400	2,050071	1,428703	1,739387



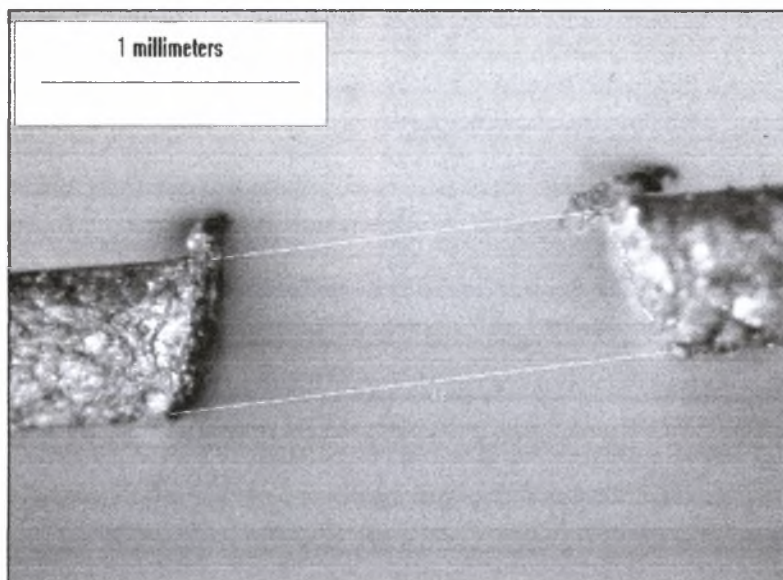
Εικόνα 22Β. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,5	64	200	2,034164	1,574037	1,8041005



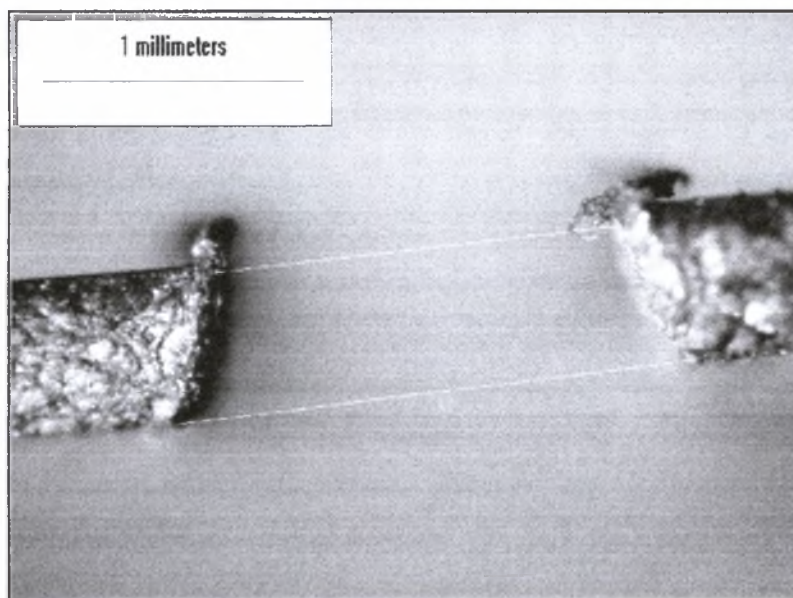
Εικόνα 23Β. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,5	64	300	2,145177	1,513054	1,8291155



Εικόνα 24B. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,5	64	400	2,190816	1,392974	1,791895



Εικόνα 25B. Μέτρηση γεωμετρίας του αρμού κοπής

Noz Diam (mm)	St Off Dist (mm)	Tra Sp (mm/ min)	Εύρος κορυφής L_1 (mm)	Εύρος κατώτερου σημείου L_2 (mm)	Kerf (mm)
1,5	96	200	2,009841	1,59347	1,8016555



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074894

